©SHUTTERSTOCK © AIRBUS SAS 2025

SCIENCES ET AVENIR

Salon du Bourget

VERS L'AVION SOBRE

p.32

DOSSIER SPÉCIAL

Comment SAPIENS A CONQUIS LE MONDE

Les 7 raisons de sa réussite

p.64

SCIENCES ET AVENIR - N° 940 - JUIN 2025 - COMMENT SAPIENS A CONQUIS LE MONDE

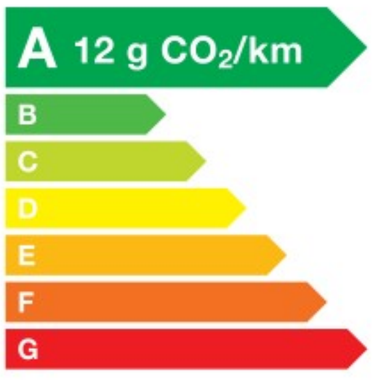
JUIN 2025 - N° 940 - ALLEMAGNE 7,40 € / ITALIE 5,70 € / LUXEMBOURG 5,70 € / GRÈCE 5,70 € / BELGIQUE 5,70 € / ESPAGNE 5,70 € / PORTUGAL 5,70 € / DOM 5,90 € / TOM 800 XPF / ILE MAURICE : 8.60€ / TOM (AVION) 1500 XPF / SUISSE 9,50 CHF / TUNISIE 10 TND / MAROC 55 DH / CANADA-USA 8,20 $

L 13418 - 940 - F: 5,30 € - RD

Croiser une borne sans s'y arrêter, c'est ça la vraie liberté.

Volkswagen Tiguan eHybrid

Nouvelle technologie Volkswagen eHybrid.
Jusqu'à 120 km d'autonomie en 100 % électrique
et jusqu'à 940 km d'autonomie cumulée*,
vous avez enfin une bonne raison de ne pas choisir.



Modèle présenté : Tiguan R-Line 1.5 eHybrid 8 CV 204 ch DSG6. Certains équipements sont en option. Plus d'informations sur volkswagen.fr *Distance totale maximum en combinaison essence/électrique pour un Tiguan eHybrid dont 128 km en 100 % électrique, données WLTP. L'autonomie réelle en mode tout électrique dépend de nombreux paramètres dont l'équipement, le style de conduite et la vitesse.

Cycles mixtes gamme Tiguan 1.5 eHybrid (l/100 km) WLTP : 0,4-0,6. Rejets de CO_2 (g/km) WLTP : 9-12. Valeurs au 15/02/2024, susceptibles d'évolution. Plus d'informations auprès de votre Partenaire.

Volkswagen Group France – SAS au capital de 198 502 510 € – 11, av. de Boursonne, Villers-Cotterêts – RCS Soissons 832 277 370.

Pensez à covoiturer #SeDéplacerMoinsPolluer

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef

Pourquoi nous ?

Dix milliards. Le pic de la population humaine sur Terre devrait être atteint dans le courant de la seconde moitié du XXIe siècle. Quel succès pour une espèce apparue il y a à peine 300 000 ans et comptant seulement 20 000 individus voici 60 000 ans !
Que s'est-il passé ensuite ? Pourquoi n'avons-nous laissé aucune place aux autres espèces du genre *Homo* ? Pourquoi nous ?
La question est « *probablement la plus importante que l'on puisse se poser concernant l'évolution humaine* », nous dit Évelyne Heyer, professeure d'anthropologie génétique au Muséum national d'histoire naturelle (*p. 82*). Car comprendre ce qui a permis notre essor revient à mieux cerner ce que nous sommes, biologiquement, cognitivement, socialement.

Comprendre ce qui a permis notre essor revient à mieux cerner ce que nous sommes, biologiquement, cognitivement, socialement

En nous appuyant sur les dernières recherches en génétique, en paléogénomique, en archéologie et en paléoanthropologie, nous avons identifié sept leviers majeurs qui ont permis à notre espèce d'émerger, de survivre, puis de s'imposer sur toute la surface du globe.
« *La biomasse des 7,9 milliards d'humains actuels* [plus de 8 milliards désormais] *et celle de leurs nombreux animaux domestiques représentent aujourd'hui plus de 20 fois celle de l'ensemble des mammifères sauvages* », avertissait le paléoanthropologue Jean-Jacques Hublin lors de sa leçon inaugurale au Collège de France en 2022. Au point d'intituler celle-ci « *Homo sapiens*, une espèce invasive » (*p. 70*). Sans point d'interrogation. De quoi présager le pire pour notre avenir et celui de la planète ?
Ce qui nous sauvera ne peut être que ce que nous sommes. Et comme le rappelait Jean-Jacques Hublin à cette même occasion : « *C'est la notion d'intelligence et de réflexion qui se trouve initialement derrière le choix du terme* « sapiens » [sage] *par le naturaliste suédois Carl von Linné.* » Intelligence et réflexion. Alors que nous sommes aujourd'hui à *« l'aube de la sixième extinction »*, pour reprendre les mots du naturaliste Bruno David, il est urgent de nous montrer digne de notre nom ! ■

SCIENCES ET AVENIR

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (11 numéros dont un double) : 35 € 1 an complet (11 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233. 304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Rédacteur en chef Sciences et Avenir Mathieu NOWAK - 01.55.35.56.38
Rédacteur en chef La Recherche Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR - 01.55.35.56.15
Rédaction en chef Les Dossiers Vincent REA - 01.55.35.56.35 avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Adjoint à la rédaction en chef
Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s
Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32
Hugo JALINIÈRE (Sciences et Avenir) - 01.55.35.56.52
Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31
Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59, Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28, Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction
Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Chef(fe)s de service Rachel FLÉAUX (MULOT) (enquêtes) - 01.55.35.56.07, Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46, Hervé RATEL (adjoint, actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78, Mathias GERMAIN (La Recherche, biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33, Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Rédaction Marine BENOIT (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.23
Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27
Sylvie ROUAT (grand reporteure, espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Assistante de direction Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Collaborateurs(trices) Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueurs Sylvie BENZONI-GAVAGE, Christophe CASSOU, Jean-Gabriel GANASCIA, Céline GUIVARCH, Claire MATHIEU
Ont participé à ce numéro B. BEAUJEU, P. BERLOQUIN, A. BRACONNIER, P. KALDY, E. LEVRESSE, W. ROWE-PIRRA, N. SCHEIDHAUER, N. TERRASSE
1re secrétaire de rédaction Sandrine HAGÈGE - 01.55.35.56.17
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Pôle digital Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70, Isabelle DO O'GOMES (cheffe de rubrique, veille) - 01.55.35.56.49, Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24, Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15, Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56, Astrid SAINT AUGUSTE (rédactrice spécialisée) - 01.55.35.56.48, Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Yann BOURDAIS chef de projet junior - Flora ISSINGUI cheffe de projet marketing digital
Courrier des lecteurs
Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines William AFTHONIADES - wafthoniades@challenges.fr
Responsable paye Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Sarah RABBAH
Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directrice de publicité Caroline GILLES - 01.44.88.89.03
Exécution : Emilien RIGNOLS - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable réabonnement: Yasmina FERHAT – 01.55.35.56.64
Responsable du marketing direct Lina QUACH - 01.55.35.56.63
Partenariats et événements – Alain SCEMAMA - 01.58.65.03.58

Les Éditions Croque Futur
Président, directeur de la publication Claude PERDRIEL
Directeur général Philippe MENAT
Directeur éditorial Maurice SZAFRAN
Secrétaire général Jean-Claude ROSSIGNOL

Origine du papier : Allemagne - Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,018 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France (Lognes), certifié PEFC

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC 10-31-1557 pefc-france.org

FR

ACPM DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte une lettre Sciences et Avenir « bienvenue aux abonnés » et un encart « Sophia Boutique – Coffret CIWL - spécial Fête des pères » jetés sur une partie de la diffusion abonnés.

Commission paritaire n° 0225 K 79712.
ISSN 3040-0457. Distribué par MLP.

Instagram demande une réglementation européenne exigeant la vérification de l’âge et un accord parental sur l’app store.

De nos jours, les ados peuvent télécharger toutes sortes d’applications depuis les app stores, y compris celles qui ne sont pas adaptées à leur âge. Offrir aux parents un meilleur contrôle sur ces téléchargements, directement là où se fait le téléchargement, peut contribuer à renforcer la sécurité des ados en ligne.

En savoir plus : Instagram.com/AccordParental

SOMMAIRE

Sciences et Avenir / N° 940 / Juin 2025

DOSSIER P. 64

Comment Sapiens a conquis le monde

Une capacité à créer et à transmettre un savoir, une fécondité hors pair, une hypersociabilité ont permis à « H. sapiens » de coloniser tous les environnements, y compris les plus hostiles, et d'être le seul « Homo » présent aujourd'hui sur Terre.

P. 32

Ces innovations pour rendre l'avion plus sobre

Moteurs sans carène, ailes pliables, biocarburants… L'industrie aéronautique développe de nouvelles technologies afin de rendre l'avion moins gourmand en carburant.

P. 42

PFAS : la vallée de la chimie empoisonnée

L'analyse des sols autour du site industriel d'Oullins-Pierre-Bénite, au sud de Lyon, révèle une contamination massive par des molécules chimiques perfluorées de synthèse.

P. 54

Comprendre et combattre les maux du ventre

Ballonnements, constipation ou douleurs abdominales : ces symptômes recouvrent des affections diverses qui peuvent être soignées grâce à des prises en charge innovantes.

3 **Édito** par Mathieu Nowak

7 **Courrier**

SCIENCES FONDAMENTALES

10 **ACTUALITÉS** Une possible activité biologique hors du Système solaire / Des hologrammes à toucher du doigt

26 **Neutrinos, les messagers cosmiques de l'extrême**

32 **Salon du Bourget : ces innovations pour rendre l'avion plus sobre**

36 **La capsule Nyx, fer de lance du fret spatial européen**

40 **Journal de l'IA : L'IA en appui de la cybersécurité**

NATURE

14 **ACTUALITÉS** Un calmar colossal filmé vivant / Le bilan des forêts détruites en 2024

42 **PFAS : la vallée de la chimie empoisonnée**

49 **Quand la montagne dévale sur un village**

52 **Fleurs de feux : la vie sous la pollution**

SANTÉ

18 **ACTUALITÉS** Une piste pour la maladie de Lyme chronique / Parkinson : les cellules souches à la rescousse

54 **Intestins : comprendre et combattre les maux du ventre**

60 **L'incroyable lenteur de notre cerveau**

62 **Nutrition : Melon et pastèques**

HISTOIRE

22 **ACTUALITÉS** Controverse sur la domestication du chat / Aux origines du pont entre l'Asie et l'Afrique

84 **Des messages cachés sur l'obélisque de la Concorde**

86 **Histoire des sciences : Camille Flammarion et les forces psychiques**

TRANSVERSALES

90 **Sélection livres**

92 **Expositions**

94 **Chroniques**
Climat par Céline Guivarch et Christophe Cassou / Mathématiques par Sylvie Benzoni-Gavage / Éthique par Jean-Gabriel Ganascia / L'œil d'Olivier Lascar

96 **Questions de lecteurs**

97 **Le ciel de juin**

98 **Jeux**

SIMON CHRISTENSEN / MOESGAARD / MOESGAARDMUSEUM.DK - SAFRAN / CFM INTERNATIONAL - BASTIEN DOUDAINE / HANS LUCAS / COLLECTIF RELIEF - SHUTTERSTOCK

CCF
BANQUE

LES MEILLEURS PRODUITS D'INVESTISSEMENT

sélectionnés pour vous

Au Crédit Commercial de France, notre indépendance nous permet de sélectionner pour vous **les meilleurs partenaires parmi les plus grandes institutions financières** telles que Eurazeo, HSBC Asset Management, Morgan Stanley, Pictet Asset Management et Rothschild & Co Asset Management.*

Rendez-vous dès maintenant **en agence** ou sur **ccf.fr**

CCF | BANQUE PATRIMONIALE DEPUIS 1917

*CCF n'a pas de lien capitalistique avec une société de gestion appartenant au même groupe financier. CCF entretient des liens économiques avec les partenaires sélectionnés. CCF - S.A. au capital de 147 000 001 euros, agréée en qualité d'établissement de crédit et de prestataire de services d'investissement, immatriculée au RCS de Paris sous le numéro 315 769 257 - Siège social : 103 rue de Grenelle - 75007 Paris. Intermédiaire en assurance immatriculé à l'ORIAS sous le numéro 07 030 182 (www.orias.fr).

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**

« La nouvelle course à l'armement »

(*Sciences et Avenir* n° 939, mai 2025)

Votre dossier sur les nouvelles armes déployées par la France est passionnant et très instructif. Il présente un double intérêt en détaillant d'une part les moyens stratégiques de défense de la nation et d'autre part les technologies employées actuelles et à venir. Mais les informations que vous publiez sont-elles compatibles avec le secret-défense ? Pourraient-elles porter atteinte à la sûreté nationale ? **Denis Vaucelle**

S. et A. : Merci pour vos compliments. Ce type de dossier est toujours délicat à réaliser. Pour recueillir l'information comme pour la transmettre. Mais il ne fournit aucune donnée technique et s'appuie sur des informations suffisamment floues divulguées par l'armée. Le secret-défense est respecté.

Accélérateurs MHD

J'ai lu avec intérêt votre dossier sur les armes nouvelles. J'ai cependant été surpris que vous ne fassiez pas mention des recherches actuelles et applications dans l'industrie, dont militaires, sur la MHD et ses variantes. **Alain de Fombelle**

S. et A. : Les accélérateurs MHD (magnétohydrodynamiques) sont actuellement prospectifs et n'ont pas encore d'application effective dans le domaine militaire, *a fortiori* dans celui des sous-marins. Cela concernera peut-être la prochaine génération d'armes.

Apesanteur vers Mars

Dans l'article passionnant « Objectif Mars » (*S. et A.* n° 938), vous insistez beaucoup sur les impacts physiologiques de l'apesanteur pour les astronautes. Je ne comprends pas pourquoi on n'envisage pas que la sonde censée amener les astronautes ne tourne pas sur elle-même à la manière d'une toupie, avec une vitesse de rotation créant une force centrifuge reproduisant artificiellement la gravité terrestre. Il n'y aurait pas besoin d'énergie supplémentaire à celle nécessaire au début pour amorcer la rotation avec la périodicité de rotation adéquate. Cela devrait, ensuite, fonctionner tel un volant d'inertie, surtout si on prévoit de stocker l'essentiel de la masse nécessaire (notamment l'eau) sur les parois extérieures de la sonde. **Philippe Cambon**

S. et A. : La force centrifuge pourrait être utilisée en effet pour engendrer une gravité artificielle et combattre les conséquences néfastes de l'apesanteur sur les astronautes, telles des pertes musculaires et de masse osseuse notamment. Cette possibilité a été souvent mise en scène dans la science-fiction, comme dans le film *2001, l'Odyssée de l'espace* et sa gigantesque station spatiale circulaire. Tel est bien le problème : il faudrait pouvoir construire des stations ou vaisseaux spatiaux de très grande taille, sous forme de roues ou de sphères, pour créer les forces suffisantes, ce qui pose d'immenses défis technologiques, sans compter les coûts. Cette solution apparaît ainsi hors de portée dans les dizaines d'années qui viennent.

Précision

Dans l'article sur la station polaire Tara (*S. et A.* n° 939, p. 63), nous avons écrit à tort que la ville de Longyearbyen se trouvait en Islande, alors qu'elle se situe dans l'archipel du Svalbard, qui fait partie de la Norvège.

La science, CQFD.
Natacha Triou
DU LUNDI AU JEUDI
16H – 17H
> Disponible sur le site et l'appli Radio France.

© Radio France/Ch. Abramowitz

En partenariat avec
SCIENCES ET AVENIR

france culture
L'esprit d'ouverture

PEUGEOT
UNE NOUVELLE ÈRE ÉLECTRIQUE

Nous sommes à l'aube d'un nouvel « âge de l'électricité ». La formule est empruntée à Fatih Birol, directeur de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), qui l'utilise pour décrire une transition majeure vers un système énergétique plus durable.

La « fée électricité » immortalisée dans la fresque de Raoul Dufy – et qui incarnait, à l'aube du XXe siècle une promesse presque miraculeuse – fait aujourd'hui son retour sous le signe du progrès. À l'avant-garde de cette révolution, l'industrie automobile fait sa mue et transforme notre rapport à la mobilité. Conscient du caractère décisif de ce moment, Peugeot a placé l'électricité au cœur de sa vision et se fixe pour ambition de devenir la première marque électrique en Europe en 2030. Radical, cet engagement va bien au-delà de la tendance ou de l'obligation réglementaire : il s'incarne dans une volonté de proposer une expérience électrique unique, capable de **concilier sobriété et plaisir.**

UN PACTE ÉCOLOGIQUE

Dans le panel des solutions vertueuses pour l'environnement, les mobilités électriques occupent une place de choix. Sur l'ensemble du cycle de vie d'un véhicule, c'est aujourd'hui la motorisation la plus sobre. Pour Peugeot, la poursuite d'une stratégie « tout électrique » est indissociable d'une volonté de préserver notre avenir et de s'engager pour les générations futures. Au-delà des grandes déclarations, cette exigence environnementale s'incarne dans les faits : Peugeot propose ainsi **la gamme 100 % électrique la plus large en Europe.** Constituée de 12 véhicules, dont trois utilitaires, elle s'étend de la citadine polyvalente E-208 au SUV sept places E-5008, en passant par le SUV emblématique E-3008 ou la toute nouvelle E-408, présentée au Mondial de l'Automobile 2024. Et parce que l'engagement environnemental n'a de sens que s'il reste accessible, l'ensemble de la gamme est éligible au **bonus écologique** jusqu'à 4 000 €, ainsi qu'à **la prime CEE (Certificats d'économies d'énergie)***. Ces aides viennent s'ajouter à un avantage souvent passé sous silence des véhicules électriques : les **gains à l'usage** qu'ils permettent de réaliser. Pour un usage de 15 000 km sur un an, le coût en carburant et entretien d'un E-3008 électrique est inférieur de 1 100 €** à son homologue hybride.

* Le dispositif des Certificats d'économie d'énergie (CEE) est un mécanisme réglementaire qui contraint les fournisseurs d'énergie et de carburant à favoriser les économies d'énergie, notamment en finançant les démarches d'efficacité énergétique des entreprises.

** Exemple d'économies estimées à l'usage d'une 3008 GT Hybrid 145 ch e-DCS6 vs. électrique 210 ch, sur la base de 15 000 km parcourus.

JUSQU'À
700 KM
D'AUTONOMIE
ÉLECTRIQUE

UN TEMPS DE CHARGE
OPTIMISÉ JUSQU'À
80 % en 30 MIN***

MOINS DE BRUIT,
DE VIBRATIONS ET D'ODEURS,
PAS DE CHANGEMENT
DE VITESSE

DESIGN ET PLAISIR AU CŒUR DE LA PROMESSE

Le passage à l'électrique n'est pas pour autant synonyme de sacrifice pour le conducteur. Au contraire, Peugeot porte **une vision de l'électrification centrée sur le plaisir.** Elle s'incarne dans un travail sur le design, félin et audacieux, tout en optimisant la performance aérodynamique. C'est ce design dynamique qui fait le succès de l'ensemble des modèles. La silhouette *fastback* de la nouvelle Peugeot E-408 est l'illustration éclatante de cette volonté. Elle laisse libre cours à l'émotion et au plaisir de conduite : comportement dynamique et direction précise avec le volant compact. Moins de bruit, de vibrations et d'odeurs, pas de changement de vitesse... La conduite électrique se distingue par une forme d'épure et de retour à l'essentiel. Enfin, la vision de l'électrification par Peugeot se manifeste dans une perpétuelle quête d'**excellence** et d'**innovation technologique.** Testées sur l'Hypercar hybride 9X8 qui court aux 24 Heures du Mans, les innovations Peugeot permettent d'atteindre les meilleures autonomies de leur catégorie sur **E-208 jusqu'à 433 km** et **E-3008,** dans la version « Long Range », **jusqu'à 700 km d'autonomie.**

UNE TRANSITION ***EN DOUCEUR***

En rebattant les cartes de la mobilité, la transition électrique transforme également les usages des conducteurs qui doivent revoir certaines de leurs habitudes. Pour simplifier cette adaptation culturelle, Peugeot multiplie les services dédiés à l'accompagnement des convertis à l'électromobilité. En premier lieu, il est nécessaire de rassurer, avec la **Garantie Peugeot Care** activée automatiquement à la réalisation des entretiens tous les deux ans dans le réseau Peugeot. Elle témoigne « *de la confiance que la marque place dans la qualité et la fiabilité de ses produits* », pour reprendre les termes de Phil York, Directeur Marketing et Communication.

C'EST LA MISSION
DE PEUGEOT CARE****
UNE GARANTIE
ALLANT
JUSQU'À **8 ANS**

JUSQU'À 8 ANS
ALLURE CARE
GARANTIE

OU 160 000 KM
SUR L'ENSEMBLE
DU VÉHICULE,
BATTERIE COMPRISE

SATISFAIT OU ÉCHANGÉ

Autre levier innovant d'assurance, cette nouvelle promesse permet à l'acheteur d'une Peugeot électrique neuve, s'il n'est pas satisfait, de l'échanger contre un véhicule hybride équivalent avant trois mois ou 3 000 km****.

Après la **tranquillité d'esprit,** Peugeot promet la simplicité avec une gamme d'équipements et de services dédiés à faciliter la transition. Des trajets courts du quotidien à la planification des déplacements les plus longs, l'application My Peugeot permet de surveiller l'autonomie des véhicules ou de programmer une recharge à distance. La marque s'engage également à fournir une borne de recharge murale Wallbox dédiée à la recharge à domicile et propose un service d'installation. En termes d'infrastructures de charge, Peugeot offre à ses clients un pass Free2Move Charge, qui permet d'accéder à un réseau de 800 000 stations à travers l'Europe. Pour les longs trajets, les Peugeot électriques intègrent un planificateur de trajet connecté. Et si l'ensemble de ces arguments ne suffit pas à franchir le pas du 100 % électrique, les consommateurs peuvent se diriger sur les mêmes modèles de véhicules en **motorisation hybride et hybride rechargeable,** une première étape dans la transition vers les mobilités électriques.

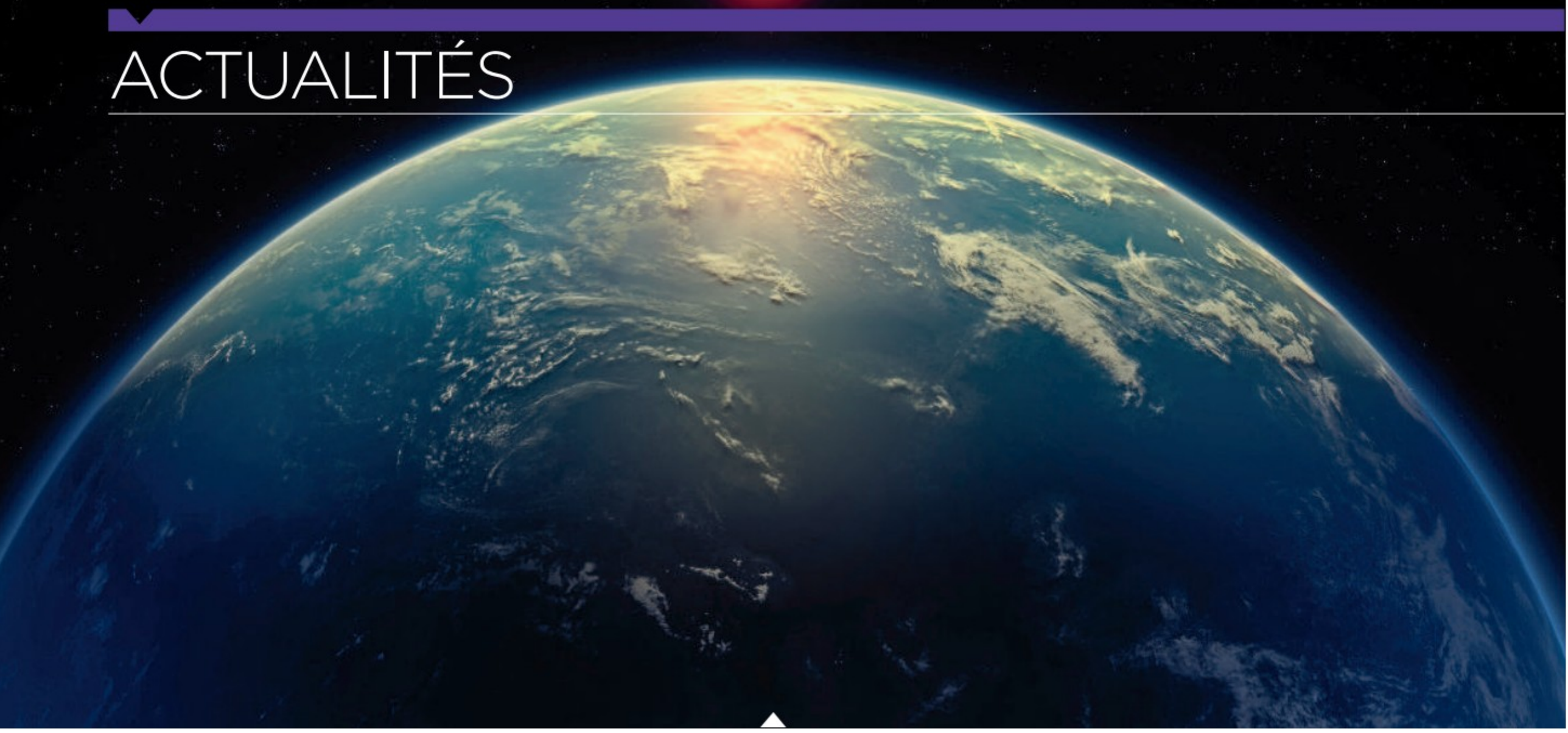
UNE HISTOIRE FRANÇAISE

Pour conclure ce récit dédié à la « nouvelle ère électrique » des mobilités, il est utile de rappeler qu'elle s'inscrit dans une histoire industrielle qui continue de se jouer en France. De la construction de la première usine automobile du groupe à Audincourt, dans le Doubs, en 1897, à la nouvelle génération d'E-3008 produite exclusivement dans l'usine de Sochaux, avec une batterie Grande Autonomie **produite entièrement en France,** Peugeot a toujours revendiqué son statut de fleuron industriel français. À l'heure où la question de la réindustrialisation est sur toutes les lèvres, c'est un motif de fierté pour le groupe, qui a déployé des efforts importants afin d'adapter son appareil industriel à l'électrique. Sur le site de Sochaux, les nouveaux 3008 et 5008 sortent des mêmes lignes, entièrement modernisées, avec une forte capacité de modulation de la production entre hybride et électrique.

TECHNOLOGIQUE, CULTURELLE, ESTHÉTIQUE, INDUSTRIELLE OU ÉCOLOGIQUE... L'AVÈNEMENT DE L'AUTOMOBILE ÉLECTRIQUE EST UNE MÉTAMORPHOSE PROFONDE POUR LE MONDE AUTOMOBILE ET LA SOCIÉTÉ DANS SON ENSEMBLE. UNE DIMENSION SYSTÉMIQUE QUE L'ON RETROUVE DANS

L'ENGAGEMENT 100 % ÉLECTRIQUE DE PEUGEOT

*** Recharge de 20 % à 80 % en 30 minutes sur une borne publique rapide à haute puissance (>200 kW) et courant électrique de forte puissance (>400 A).
**** Conditions de l'offre disponibles sur Peugeot.fr



Située à environ 124 années-lumière, K2-18b orbite dans la zone d'habitabilité de son étoile, une naine rouge (vue d'artiste).

Une possible activité biologique hors du Système solaire

Des chercheurs prétendent avoir détecté dans l'atmosphère de l'exoplanète K2-18b des signes de composés chimiques considérés comme des biosignatures d'une potentielle forme de vie extraterrestre.

« *Ce que nous observons à ce stade sont des indices d'une possible activité biologique hors du Système solaire.* » C'est l'annonce incroyable faite lors d'une conférence de presse par Nikku Madhusudhan, astrophysicien à l'université de Cambridge (Royaume-Uni). « *Je pense que c'est le cas le plus proche d'une caractéristique que nous pouvons attribuer à la vie* », a même assuré le chercheur, auteur principal d'une étude publiée dans *The Astrophysical Journal Letters*. Menée par une équipe américano-britannique à partir de données recueillies par le télescope spatial James-Webb, l'étude s'est concentrée sur K2-18b, une exoplanète découverte en 2015 à environ 124 années-lumière de la Terre, dans la constellation du Lion. Orbitant autour d'une naine rouge — une étoile plus petite et moins chaude que le Soleil —, K2-18b est 2,6 fois plus grande et 8,6 fois plus massive que la Terre. Jusqu'ici, elle était surtout connue pour graviter dans la zone d'habitabilité de son étoile, et posséder de la vapeur d'eau dans son atmosphère ainsi que du dioxyde de carbone et du méthane. Cette fois, les chercheurs prétendent avoir détecté dans son atmosphère des signes de composés chimiques longtemps considérés comme des biosignatures d'une possible vie extraterrestre : du sulfure de diméthyle (DMS) et du disulfure de diméthyle (DMDS). Des molécules qui, sur Terre, sont produites par le phytoplancton, et sont de ce fait considérées comme des biomarqueurs d'une activité biologique.

Des océans de lave seraient plus plausibles

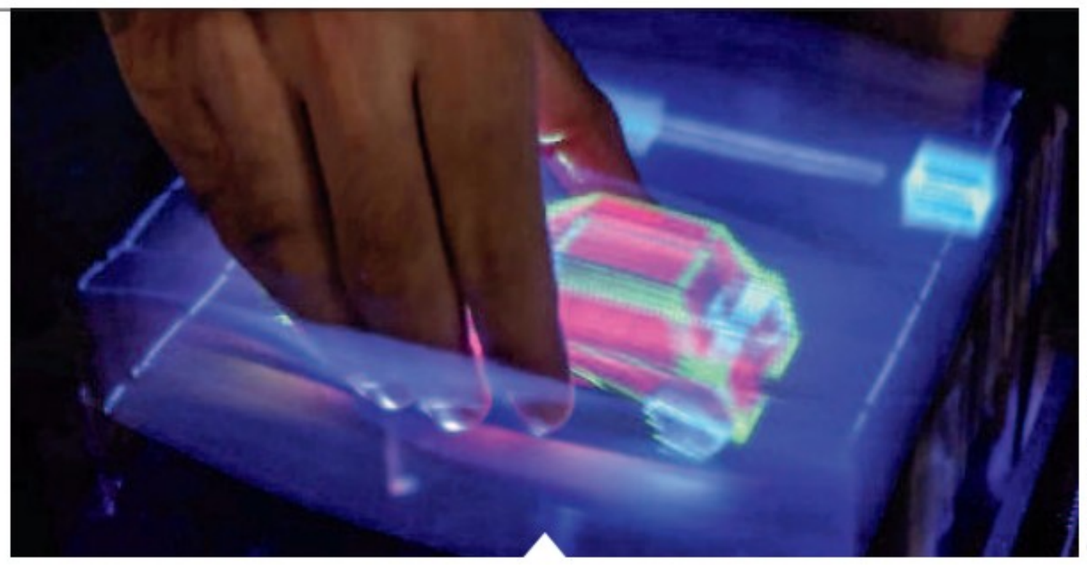
Mais les résultats présentés sont loin d'avoir convaincu le milieu scientifique. D'abord parce que les signaux présentés restent au-dessous du seuil de signification statistique considéré comme crucial pour valider une détection. Surtout, une étude a rapporté en 2024 des traces de DMS sur une comète, suggérant que cette substance pourrait être produite par des moyens encore inconnus, sans lien avec la vie. Autre difficulté : K2-18b orbite autour de son étoile en seulement 33 jours. Pour Raymond Pierrehumbert, professeur de physique planétaire à l'université d'Oxford (Royaume-Uni), qui l'a étudiée, elle serait donc trop chaude pour abriter la vie. « *Si cette planète avait de l'eau, ce serait une fournaise infernale, totalement inhabitable* », a-t-il affirmé, ajoutant que des océans de lave étaient plus plausibles. Les auteurs de la troublante annonce espèrent désormais obtenir 16 à 24 heures d'observations supplémentaires avec le télescope James-Webb pour confirmer la présence de sulfure de diméthyle. ■

Joël Ignasse

A. SMITH, N. MADHUSUDHAN/UNIVERSITY OF CAMBRIDGE

Des hologrammes à toucher du doigt

Un dispositif de projection 3D sur un système d'écrans élastiques permet d'interagir avec des objets virtuels directement avec les mains.



IÑIGO EZCURDIA 2025

Les bandes flexibles de l'écran permettent à la main de passer pour manipuler l'image.

Présenté fin avril à la conférence sur les interactions homme-machine à Yokohama (Japon) par une équipe de l'université de Navarre (Espagne), FlexiVol est un système d'écran constitué d'une série de bandes flexibles parallèles de 2 cm de large en élasthanne, silicone et polyester. Cet assemblage est monté sur ressort pour être soumis à un mouvement oscillatoire de forme sinusoïdale et ultrarapide : 2880 hertz. Cette fréquence est synchronisée avec des projections. Autrement dit, 2880 images par seconde s'affichent sur un écran qui bouge dans le sens de la profondeur. La persistance rétinienne chez l'utilisateur crée alors l'illusion d'objets en volume, tels des hologrammes. Ceux-ci peuvent ainsi être manipulés. En effet, les bandes élastiques de l'écran laissent la main passer pour attraper, déplacer et faire pivoter ou glisser les éléments. Deux caméras stéréoscopiques combinées à un logiciel de suivi de mouvement servent à recalculer les projections en temps réel en fonction des gestes de l'utilisateur. ■ **A. D.**

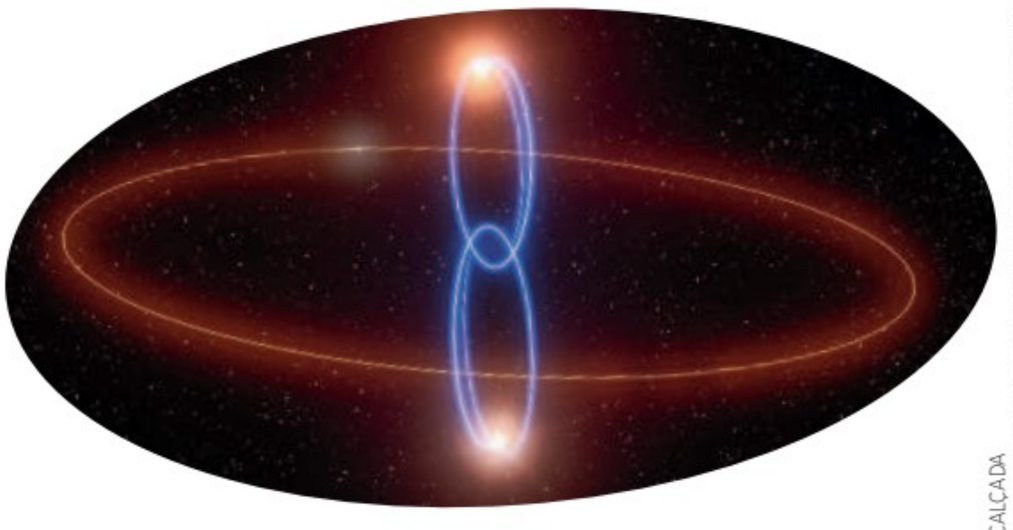
EN DEUX MOTS

BIOTECHNOLOGIES Au Japon, un drone a été équipé d'une antenne de papillon de nuit lui permettant de localiser la source d'une odeur plus précisément qu'un capteur électrique. **DEEPFAKE** Des tests menés sur 600 personnes révèlent que seuls 60 % d'entre elles étaient capables de distinguer une voix humaine d'une voix générée par IA. **CHINE** L'ingénieur en chef de la mission chinoise Chang'e 8 (2028) a annoncé réfléchir à installer une centrale nucléaire sur la Lune.

Une exoplanète en orbite polaire autour de ses étoiles

ASTRONOMIE Des astronomes européens ont découvert une planète gravitant autour de deux jeunes naines brunes dans une orbite dite polaire, c'est-à-dire perpendiculaire au plan orbital des étoiles. Ce système inédit, nommé 2M1510, a été révélé après l'analyse d'anomalies gravitationnelles détectées entre 2017 et 2023. **J. I.**

SOURCE : THOMAS BAYCROFT, UNIVERSITÉ DE BIRMINGHAM, ROYAUME-UNI.



ESO/L. CALÇADA

2M1510 b a une orbite perpendiculaire au plan dans lequel se déplacent les deux étoiles (vue d'artiste).

Internet quantique : l'Europe contre-attaque

INFORMATIQUE Pour la première fois, des chercheurs européens ont transmis des données chiffrées de façon quantique sur 254 km entre Francfort et Kehl, en Allemagne. Un protocole rendant impossible l'interception du message. La transmission s'est faite *via* des infrastructures télécoms existantes (fibre optique), là où la Chine, en pointe dans le domaine, n'utilise que des réseaux dévolus à la communication quantique refroidis à très basse température. **F. N.**

SOURCE : MIRKO PITTALUGA, TOSHIBA EUROPE, ROYAUME-UNI.

2025 EPFL/JAMANI CAILLET

L'électronique présente dans le gâteau est comestible.

RoboCake, le robot qui se mange

ROBOTIQUE Projet mené par des chercheurs de l'EPFL (Suisse) avec l'école hôtelière de Lausanne, ce gâteau est surmonté d'oursons en gélatine parfumés au sirop de grenade, qui dansent grâce à un système pneumatique interne. Des bougies à LED sont, elles, alimentées par une pile rechargeable en vitamine B2, quercétine (un composé organique), charbon actif et chocolat noir. Elle est entièrement comestible et offre une solution à la question des déchets électroniques. **A. D.**

Un nugget de poulet artificiel

BIOTECHNOLOGIE Le plus gros morceau de viande de synthèse a été présenté par une équipe japonaise. Pesant une dizaine de grammes, il a été obtenu à partir de cellules de poulet cultivées en laboratoire. Pour atteindre ce poids record, les scientifiques ont eu recours à un bioréacteur doté de plus d'un millier de fibres creuses microscopiques imitant les vaisseaux sanguins et permettant d'apporter les nutriments nécessaires aux cellules en profondeur dans le tissu en croissance. **H. J.**

SOURCE : MINGHAO NIE, UNIVERSITÉ DE TOKYO, JAPON.

SHOJI TAKEUCHI, THE UNIVERSITY OF TOKYO

Ce morceau de viande de synthèse pèse environ 10 g.

ROGER DE LA HARPE / BIOSPHOTO

Dès sa formation, notre planète était bien plus riche en hydrogène qu'on ne le pensait, démontre une étude.

La Terre aurait toujours contenu de l'eau

Selon des chercheurs britanniques, l'eau n'aurait pas été apportée par les comètes et des astéroïdes.

L'eau est présente sur notre planète depuis sa naissance il y a 4,6 milliards d'années, soutiennent des géologues britanniques de l'université d'Oxford. Dans sa très grande majorité, elle n'aurait donc pas été apportée par les comètes et astéroïdes qui s'y sont écrasés par la suite, comme les scientifiques le pensaient depuis des décennies. En 2020, des chercheurs français avaient déjà fourni les premières preuves. En étudiant un certain type de météorites (appelées « chondrites à enstatite ») ayant servi de matériau de base lors de l'accrétion de la Terre, ils avaient découvert une quantité insoupçonnée d'hydrogène qui, en se combinant à l'oxygène, aurait formé les molécules d'eau. Des doutes subsistaient néanmoins sur une possible contamination par des matériaux terrestres. Ils viennent d'être levés par l'analyse d'un autre spécimen de chondrite à enstatite récupéré en Antarctique. Celui-ci recelait en outre cinq fois plus d'hydrogène que ce qui était estimé jusqu'à présent ! De quoi balayer encore plus l'hypothèse d'une origine extraterrestre de l'eau. ■ **F. D.**

10 %
L'économie de café grâce à la physique

PHYSIQUE **Au moyen d'un laser, d'une caméra ultrarapide et de petites billes transparentes, des physiciens ont mis en équation une façon d'optimiser l'extraction des arômes lors du mélange de la mouture et de l'eau chaude pour un café filtre. Ils recommandent d'utiliser une bouilloire à col-de-cygne pour verser l'eau frémissante, de manière lente et à quelques dizaines de centimètres au-dessus du filtre, en maintenant surtout un écoulement laminaire. F. D.**

SOURCE : E. PARK, UNIVERSITÉ DE PENNSYLVANIE, ÉTATS-UNIS.

Une planète aux allures de comète

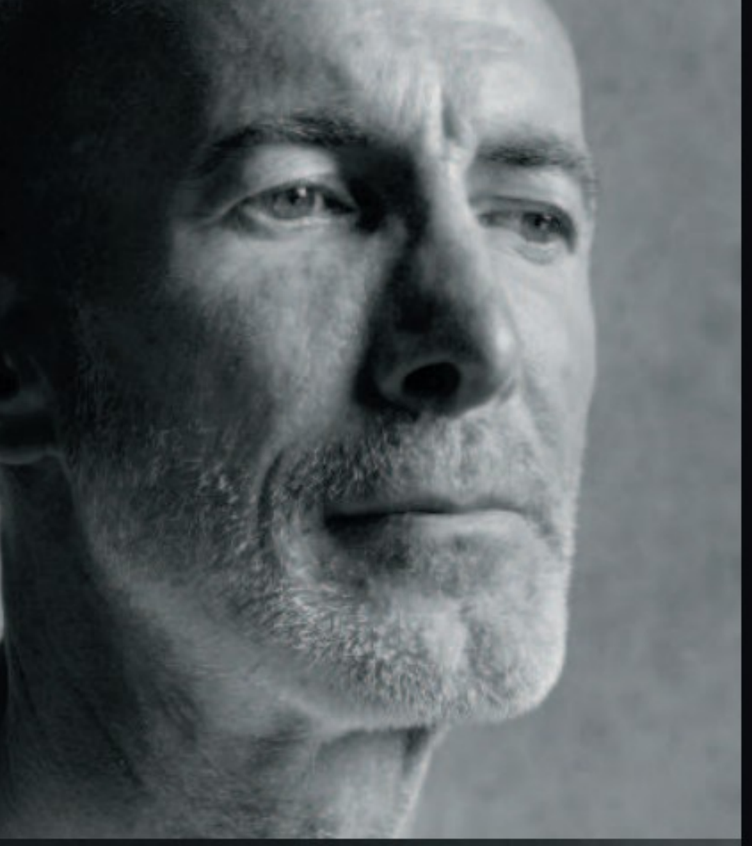
ASTRONOMIE À 140 années-lumière de la Terre, la planète BD+05 4868b orbite à seulement 3 millions de km de son étoile. Résultat : elle fond littéralement par une température de 1600 °C, perdant à chaque révolution de 30,5 heures une quantité de matière équivalente à la masse du mont Everest. L'immense flux de poussières vaporisées s'étend sur 9 millions de km. **F. N.**

SOURCE : MARC HON, MIT, ÉTATS-UNIS.

JOSE-LUIS OLIVARES, MIT

Tester l'effet Einstein dans l'espace

PHYSIQUE L'horloge atomique Pharao, de conception française, a été arrimée le 25 avril au laboratoire Columbus de la Station spatiale internationale (ISS). Avec une précision dix fois plus importante que les précédentes mesures, elle testera la prédiction d'Albert Einstein selon laquelle l'écoulement du temps dépend du champ de gravité : donc un rythme légèrement plus rapide en orbite que sur Terre. Objectif : identifier d'éventuelles failles dans la théorie. **F. D.**



GSK

" Le zona ?
Je ne le souhaite
à personne.
Je n'ai jamais ressenti
une telle douleur.

Je pensais que j'étais trop jeune, j'avais tort." *

Plus de 90 % des 65 ans et plus sont déjà porteurs du virus responsable du zona.**

Parlez-en à votre médecin ou votre pharmacien dès aujourd'hui.

Plus d'informations sur
demain-sante.fr

*Comédiens relatant des témoignages de patients.

**Les personnes porteuses du virus ne développeront pas toutes un zona.

NP-FR-HZU-PRSR-240004-V1 - Juillet 2024 © 2024 Groupe GSK ou ses concédants.

ROV SUBASTIAN / SCHMIDT OCEAN INSTITUTE

« Mesonychoteuthis hamiltoni » a été filmé à 600 m de profondeur au large des îles Sandwich du Sud.

Un calmar colossal filmé vivant

Cet animal insaisissable a enfin pu être observé : un spécimen qui pourrait atteindre 7 mètres à l'âge adulte et peser 500 kg.

C'est une première mondiale : un calmar colossal (*Mesonychoteuthis hamiltoni*) a été filmé vivant dans son environnement naturel, au large des îles Sandwich du Sud, dans l'océan Atlantique Sud. L'observation a été réalisée en mars à 600 mètres de profondeur par un robot sous-marin du Schmidt Ocean Institute, une organisation privée américaine. Il montre un jeune spécimen de 30 centimètres de long, presque transparent, évoluant dans les profondeurs marines. Attention, il s'agit bien d'un calmar colossal, pas d'un calmar géant. Le second, *Architeuthis dux*, est le plus long des céphalopodes. Il peut mesurer jusqu'à 18 mètres de long, tentacules étendus (il a huit bras, plus courts, et deux tentacules). Les calmars colossaux ne dépassent pas 7 mètres de long à l'âge adulte. Mais comme ils peuvent peser près de 500 kg, ce sont des champions de la grande profondeur, et ce sont les invertébrés les plus lourds de la planète.

Le céphalopode restait mystérieux

Découvert il y a un siècle, ce céphalopode géant restait jusqu'alors insaisissable. Il était connu uniquement par des restes retrouvés dans l'estomac de cachalots ou pris accidentellement dans des filets. Un spécimen de calmar colossal capturé en 2007 dans les eaux antarctiques a sa dépouille exposée au musée Nouvelle-Zélande Te Papa Tongarewa, à Wellington.

Ce juvénile a été filmé au cours d'une expédition de trente-cinq jours menée à bord du navire de recherche *Falkor*. Elle s'inscrit dans le cadre du programme Ocean Census impliquant des institutions du Royaume-Uni et d'Allemagne. L'objectif : explorer les profondeurs marines et découvrir de nouvelles espèces. De fait, ces zones regorgent d'une vie extraordinaire qui demeure largement méconnue.
En mars 2024, une précédente expédition impliquant le Schmidt Ocean Institute avait permis de découvrir au large du Chili pas moins d'une centaine d'espèces (dont un intrigant « poisson à pattes »). Les spécialistes estiment que des millions d'autres restent à découvrir. ■ **O. L.**

15 %

La part des terres agricoles polluées aux métaux lourds

ENVIRONNEMENT L'examen de 796 000 échantillons de sol cultivable provenant du monde entier révèle que la contamination à un métal lourd toxique, comme le cadmium ou l'arsenic, concernerait entre 14 et 17 % des terres agricoles et pourrait menacer la santé de près de 1,4 milliard de personnes. La Chine, l'Inde et le Moyen-Orient sont particulièrement concernés. **E. T.**

SOURCE : DEYI HOU, TSINGHUA UNIVERSITY, CHINE.

Mommy, l'animal le plus âgé à se reproduire

ZOOLOGIE Le zoo de Philadelphie aux États-Unis a eu le plaisir d'annoncer que Mommy, sa tortue géante des Galapagos âgée de 97 ans, et Abrazzo son compagnon nonagénaire, ont enfin produit une descendance vivante : quatre petites tortues. En plaçant la moitié des œufs à une température plus basse, des mâles ont même pu être obtenus. Une bonne nouvelle pour cette sous-espèce en danger critique d'extinction, comme trois autres sur les sept que compte encore l'archipel. **P. K.**

PHILADELPHIA ZOO

La tortue géante des Galapagos Mommy a 97 ans.

La chenille qui se déguisait avec des charognes

ÉTHOLOGIE C'est un camouflage totalement inédit que viennent de découvrir des chercheurs de l'université d'Hawaii (États-Unis). Pour masquer sa présence à l'araignée propriétaire de la toile sur laquelle elle vit et chasse, cette chenille du genre *Hyposmocoma* se déguise en arborant sur son cocon de soie… des bouts de cadavres. Ailes et pattes de mouche, abdomen de coléoptère, tête de charançon… toutes sortes de charognes que l'araignée aurait abandonnées sur sa toile. **H. R.**

SOURCE : DANIEL RUBINOFF, UNIVERSITÉ D'HAWAII, ÉTATS-UNIS.

DANIEL RUBINOFF LAB/ ENTOMOLOGY SECTION

« Hyposmocoma » utilise les restes de proies d'araignée pour camoufler son cocon.

Les coraux éprouvés par une vague de blanchissement

OCÉANOGRAPHIE Entre le 1er janvier 2023 et le 20 avril 2025, un stress thermique synonyme de blanchissement des coraux a touché 83,7 % des récifs de la planète, selon l'Agence américaine d'observation océanique et atmosphérique. C'est le quatrième épisode massif de blanchissement depuis 1998. Il est dû à des températures océaniques inédites depuis 2023, menaçant d'épuiser la résilience de ces organismes. **H. J.**

JOHN SONNTAG/NASA

Les suies accumulées sur la banquise de la mer de Weddell accélèrent la fonte.

L'impact des brûlis d'Amazonie sur l'Antarctique

POLLUTION Les suies carbonées produites en Amazonie par les incendies de déforestation sont transportées par des « rivières atmosphériques » jusqu'en Antarctique, où elles se déposent et noircissent la glace. Or une étude montre, à l'aide d'images satellitaires, une corrélation entre ce noircissement de la glace et une fonte accélérée, notamment en mer de Weddell. Si le lien de causalité reste sujet à débat, l'impact global des feux amazoniens inquiète les scientifiques. **S. R.**

SOURCE : SUDIP CHAKRABORTY, UNIVERSITÉ DU MARYLAND, ÉTATS-UNIS.

DOMINIQUE GILLIÉRON

QUESTIONS À

Dominique Gilliéron

Responsable des projets d'observation de la Terre à l'ESA

Un satellite va modéliser le cycle du carbone

La mission Biomass de l'Agence spatiale européenne (ESA) a été lancée le 29 avril. Ce satellite doit apporter des données cruciales pour mieux modéliser le climat.

Comment s'est passé le lancement ?
Idéalement : la fusée Vega-C a placé le satellite dans son orbite nominale avec une précision remarquable. Cela permet d'économiser le carburant du satellite et d'envisager d'étendre la durée de la mission au-delà des cinq ans prévus. Par ailleurs, l'étape délicate du déploiement de l'antenne radar de 12 m de Biomass s'est déroulée sans encombre.

À quoi doit servir Biomass précisément ?
La mission est conçue pour évaluer la capacité des forêts tropicales à stocker le carbone, donnée cruciale pour modéliser l'évolution du climat. Le satellite embarque pour cela le premier radar en bande P permettant de pénétrer les feuillages les plus denses et d'atteindre le sol. De quoi mesurer précisément la hauteur des arbres et la quantité de troncs et de branches qui séquestrent le carbone.

Y a-t-il d'autres missions importantes pour le climat à court terme ?
Cinq autres lancements de satellites d'observation de la Terre sont programmés pour 2025. MTG-S pour la première mesure en orbite géostationnaire de la pollution atmosphérique, Sentinel-1D qui documentera l'usage du sol et la déforestation, ou encore Sentinel-6B pour la mesure au millimètre près du niveau des océans. ■ **Propos recueillis par H. J.**

IL A DIT

« L'humanité a perturbé la tectonique des plaques juste pour améliorer les rendements de coton »

Simon Lamb, chercheur en géosciences à l'université de Wellington (Nouvelle-Zélande), auteur d'une étude montrant que l'assèchement de la mer d'Aral pour la culture du coton a affecté la croûte terrestre, libérée de la pression des 1000 milliards de tonnes d'eau évaporée.

BOWLAND ET AL.

Le fruit à pain fermenté (et alcoolisé) rassemble les grands singes.

Les chimpanzés aussi se réunissent pour l'apéritif

ÉTHOLOGIE Le gros fruit de l'arbre à pain tombé à terre et qui a fermenté est très apprécié des chimpanzés. Ils n'hésitent pas à le consommer à plusieurs, ont observé des chercheurs dans une réserve de Guinée-Bissau. Ces réunions autour d'un mets abondant et légèrement alcoolisé rassemblent pacifiquement des individus de tous âges, des deux sexes et sans lien évident de parenté. Elles s'avèrent un moyen de sociabilisation commun à tous les grands singes d'Afrique, notre espèce comprise. **P. K.**

En Chine, le solaire et l'éolien s'envolent

ÉNERGIE Si 60 % de la consommation énergétique chinoise restent assurés par le charbon, la puissance éolienne et solaire installée dépasse désormais celle issue des installations thermiques, a annoncé l'autorité chinoise de l'énergie. Au premier trimestre 2025, la capacité totale du réseau des renouvelables s'est portée à 1482 gigawatts, contre 1451 gigawatts pour les centrales thermiques. Encore premier émetteur mondial de CO_2 à ce jour, la Chine vise la neutralité carbone en 2060. **H. J.**

BIOSPHOTO

À VOIR SUR LE NET

À l'écoute des crabes violonistes

ÉTHOLOGIE Les mâles crabes violonistes européens (*Afruca tangeri*) tambourinent le sol de leur corps et de leurs pinces pour générer des vibrations sismiques à destination de leurs prétendantes. À travers une danse solitaire en quatre temps filmée par une équipe de biologistes, les signaux transmettent des informations essentielles sur leur potentiel reproductif. **N. T.**

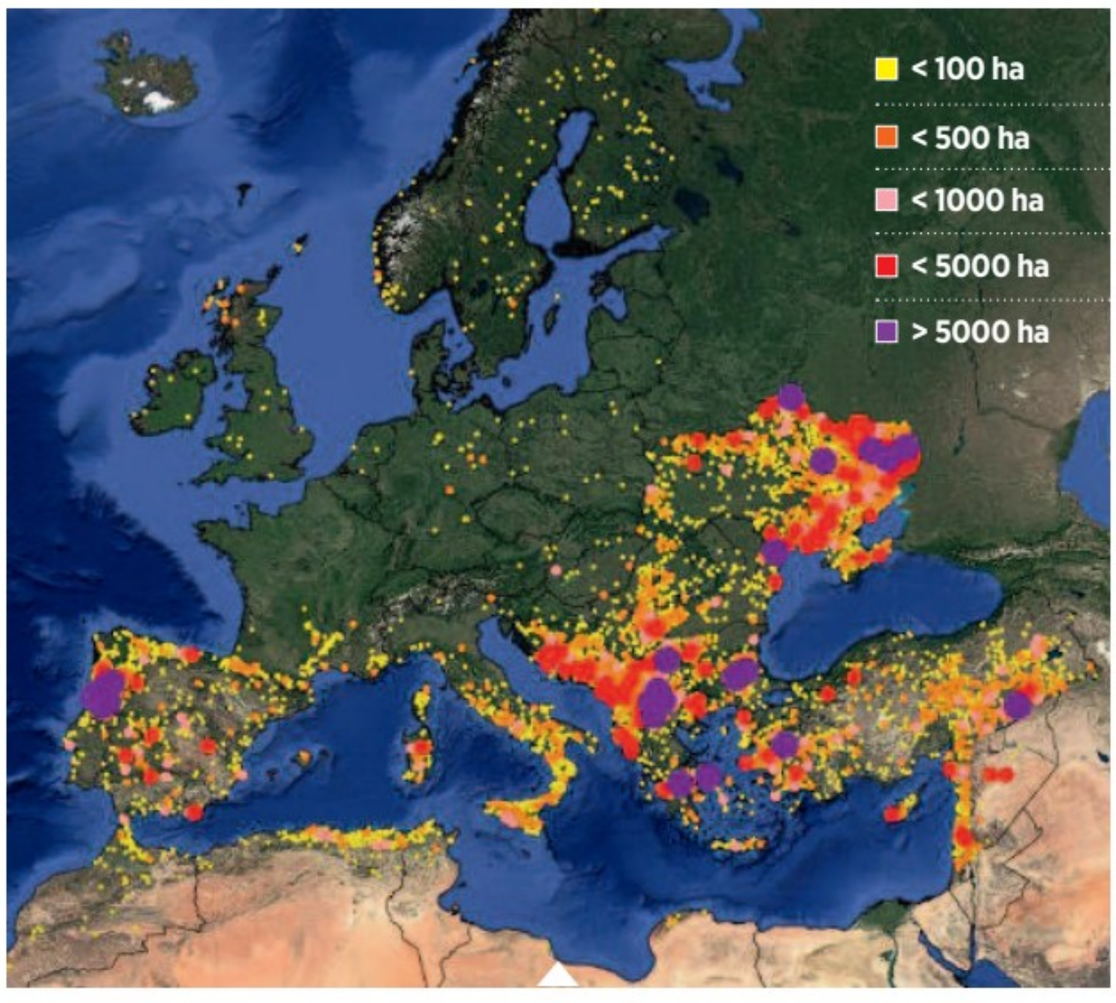
SOURCE : TOM MULDER, UNIVERSITÉ D'OXFORD, ROYAUME-UNI

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

Le bilan des forêts détruites en 2024

L'Ukraine a été durement frappée avec près d'un million d'hectares brûlés le long de la ligne de front.

Sur l'ensemble des surfaces brûlées en Europe, au Moyen-Orient et en Afrique du Nord en 2024, la moitié l'a été en Ukraine, montre la carte des feux établie par les satellites européens d'observation Copernicus. Près d'un million d'hectares (ha) de végétation sont partis en fumée, principalement le long de la ligne de front et dans le Donbass occupé. Un record. Leur étendue était souvent exceptionnelle : plus d'une centaine de feux ont concerné des superficies de plus de 1000 hectares. Un quart concernait des forêts et un tiers des surfaces agricoles, précise le rapport du Système d'information sur les feux de forêt européen (Effis), qui signale que l'année est autrement restée dans la moyenne des surfaces brûlées. **P. K.**



EU. 2025 - GWIS

Les pays les plus affectés sont, outre l'Ukraine (1 million d'ha), le Portugal (147 000 ha), la Turquie (131 000) et la Macédoine du Nord (98 000 ha).

Pourquoi choisir
entre le prix et le goût
quand on peut choisir Lidl ?

RECONNU SAVEUR DE L'ANNÉE 2025

Aiguillettes de poulet
400 g (1 kg = 13,98 €)

5.59 €

Étude Monadia : testé par 60 consommateurs entre septembre et décembre 2024

RECONNU SAVEUR DE L'ANNÉE 2025

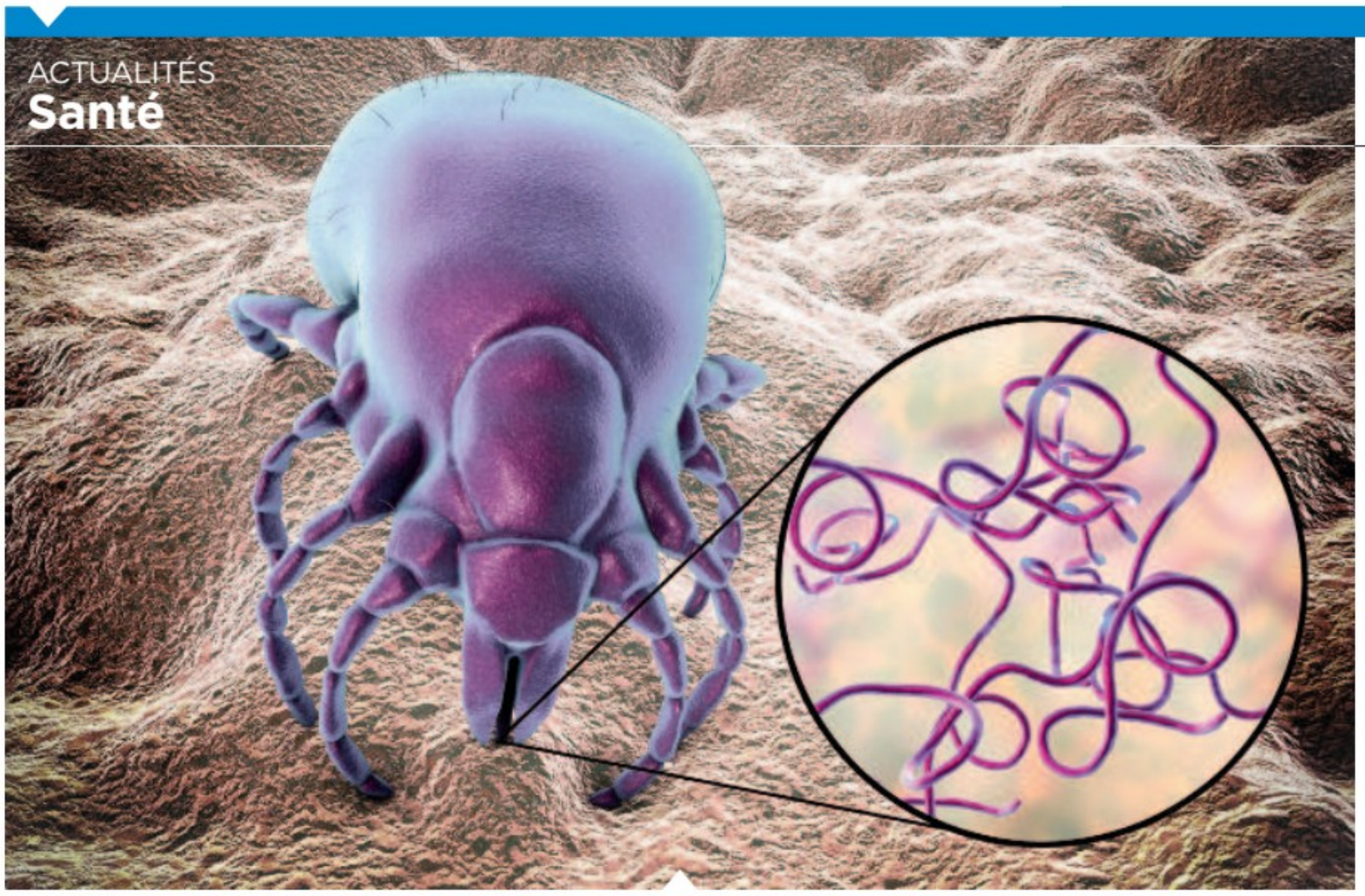
Aiguillettes de poulet
400 g (1 kg = 13,98 €)

5.59 €

Selon arrivage en supermarché

Origine FRANCE Origine ALLEMAGNE Origine DANEMARK Origine PAYS-BAS

Pour votre santé, évitez de grignoter entre les repas www.mangerbouger.fr



SPL/BSIP

Transmise par la tique, parasite acarien qui se nourrit de sang, la bactérie « Borrelia burgdorferi » (en médaillon) est responsable de la maladie de Lyme (illustration).

Une piste pour la maladie de Lyme chronique

Des débris bactériens s'accumulant dans le foie pourraient expliquer les symptômes de cette infection.

Les fortes fatigues, douleurs diffuses, troubles cognitifs qui suivent parfois le traitement antibiotique de la maladie de Lyme pourraient être dus à des fragments de la bactérie *Borrelia burgdorferi* responsable de l'infection. Une équipe de Chicago (États-Unis) a découvert que des débris d'une composante de la paroi de cette bactérie, le peptidoglycane, s'accumulent durablement dans le foie chez la souris, ce qui ne s'observe pas dans d'autres infections bactériennes. De plus, ces fragments sont capables d'induire une forte réaction des cellules immunitaires humaines. Or, ces mêmes débris bactériens se retrouvent aussi dans le liquide synovial de personnes dont l'arthrite du genou persiste malgré un traitement antibiotique. Le foie pourrait ainsi agir comme un réservoir de déchets bactériens provoquant des symptômes observés dans le « syndrome infectieux post-borréliose traitée », aussi appelé « Lyme chronique ».

Un dosage des anticorps pour aider au diagnostic

« Ces travaux sont très intéressants, car ils offrent une piste plausible d'explication liée à la persistance non pas d'hypothétiques bactéries "cachées" et résistantes aux antibiotiques, mais de débris de celles-ci qui pourraient perturber l'organisme chez un petit nombre de patients pourtant guéris de leur infection active », commente Cédric Lenormand, dermatologue aux hôpitaux universitaires de Strasbourg. Dans la plupart des cas, l'infection marquée par le développement d'un érythème migrant dans le mois suivant la piqûre par la tique est guérie par un traitement antibiotique court de 10 à 14 jours. Pour les autres formes cliniques où l'implication de la bactérie est moins évidente, un dosage des anticorps contre *B. Burgdorferi* dans le sang et le liquide céphalo-rachidien peut aider au diagnostic, selon la mise à jour des recommandations de la Haute Autorité de santé publiée cette année. Pour les cas les plus complexes, une prise en charge multidisciplinaire est possible par les centres de compétence et de référence des maladies vectorielles à tiques qui maillent désormais le territoire français. **P. K.**

-83 %

La réduction des hospitalisations pour bronchiolite en 2023

PÉDIATRIE Une méta-analyse montre une réduction drastique du risque d'hospitalisation pour bronchiolite des nourrissons ayant reçu le Beyfortus. L'anticorps nirsévimab injectable aux nouveau-nés permet en effet d'éviter les formes graves de cette infection des bronches provoquée par le virus respiratoire syncytial. **H. J.**

SOURCE : DEWAN SUMSUZZMAN, UNIVERSITÉ DE YORK, CANADA.

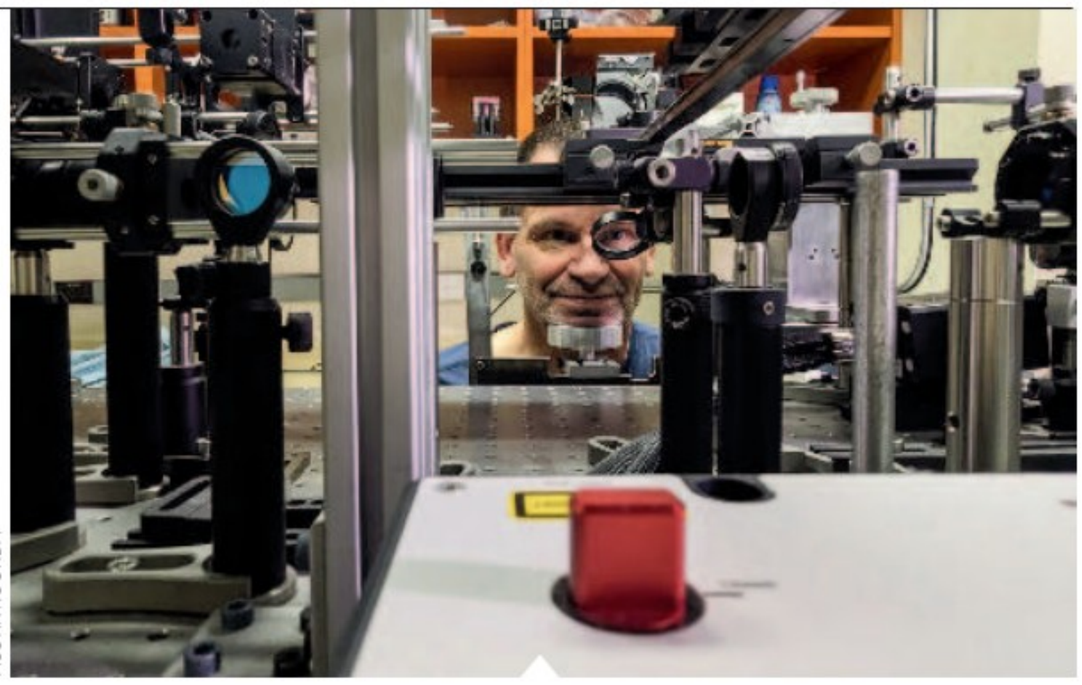
Manger le jour contre les effets du travail de nuit

BIOLOGIE S'il est bien établi que le travail de nuit accroît les risques cardio-vasculaires, des chercheurs montrent que prendre ses repas en journée serait un moyen de réduire ces risques. C'est la conclusion d'une expérimentation menée sur 20 personnes. Leurs paramètres biologiques — comme la pression sanguine ou l'activité du système nerveux végétatif régulant le rythme cardiaque, la respiration ou la digestion — étaient ainsi améliorés lorsqu'ils prenaient leur repas de jour. **C. L.**

SOURCE : SARAH CHELLAPPA, HARVARD MEDICAL SCHOOL, ÉTATS-UNIS.

F. SCHEIBER/SIPA

Travailler de nuit augmente les risques cardio-vasculaires.



AUSTIN ROORDA

La machine de l'université de Berkeley a révélé un bleu-vert inédit.

Une nouvelle couleur indécelable à l'œil humain

OPHTALMOLOGIE Il existe un bleu-vert si saturé que vous ne pouvez qu'essayer de l'imaginer, mais pas de le voir… Sauf grâce à l'étonnante machine de l'université de Berkeley (États-Unis). Conçu à partir d'une cartographie de chacun des trois types de cônes d'une rétine, ce dispositif a pu sélectivement en stimuler certains d'une façon impossible à obtenir en conditions naturelles. Cette nouvelle stratégie pourrait permettre aux daltoniens de retrouver la perception de certaines couleurs. **C. G.**

SOURCE : JAMES FONG, UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE À BERKELEY, ÉTATS-UNIS.

Ce faux sucre qui donne faim

NUTRITION Le sucralose, un édulcorant artificiel courant, commercialisé notamment sous les noms de Canderel et Aqualoz, a tendance à… ouvrir l'appétit ! C'est ce que révèlent des tests menés sur 75 personnes âgées de 18 à 35 ans qui ont déclaré avoir une sensation de faim plus importante après l'absorption d'une boisson au sucralose. Une impression étayée à l'imagerie cérébrale qui montre une augmentation du flux sanguin vers l'hypothalamus, une région du cerveau impliquée dans la sensation de faim. **H. J.**

SOURCE : SANDHYA P. CHAKRAVARTTI, UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE DU SUD, ÉTATS-UNIS.

Un implant cérébral auditif flexible

AUDIOLOGIE Pour les patients souffrant de surdité et dont le nerf auditif est trop endommagé pour bénéficier des implants cochléaires, une équipe suisse vient de présenter un dispositif à placer directement sur le tronc cérébral. Au contraire des précédents prototypes, trop rigides pour épouser le tissu nerveux, celui-ci est fait d'électrodes intégrées dans une couche de silicone, formant un dispositif flexible de moins d'un millimètre d'épaisseur. **H. J.**

SOURCE : ALIX TROUILLET, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, SUISSE.

EPFL/ALAIN HERZOG

Le dispositif souple et ultrafin épouse parfaitement les tissus cérébraux.

La Lorraine à la pointe de l'innovation et de la recherche avec
unys

Neuf établissements - Université de Lorraine, CNRS, CHRU de Nancy, INRAE, Inria, AgroParisTech, Georgia Tech Europe, Incubateur Lorrain, UL Propuls - ont fait le choix d'unir leurs forces sous une bannière commune pour mieux répondre aux défis du XXIe siècle : une dynamique collective unique en France !

Une expertise de premier plan pour booster l'innovation

4 486 chercheur·es et enseignant·es-chercheur·es, 68 laboratoires, 3 incubateurs, Unys c'est une communauté académique et scientifique qui grâce à une approche multidisciplinaire, analyse en profondeur les problématiques actuelles dans les secteurs de la santé, l'énergie, l'environnement, les matériaux, la société et le numérique. L'objectif des 9 entités : accélérer fortement les dynamiques d'innovation sur le territoire et proposer un maximum de solutions innovantes aux entreprises, aux collectivités et aux citoyennes et citoyens.

Un média qui fait rayonner la recherche lorraine

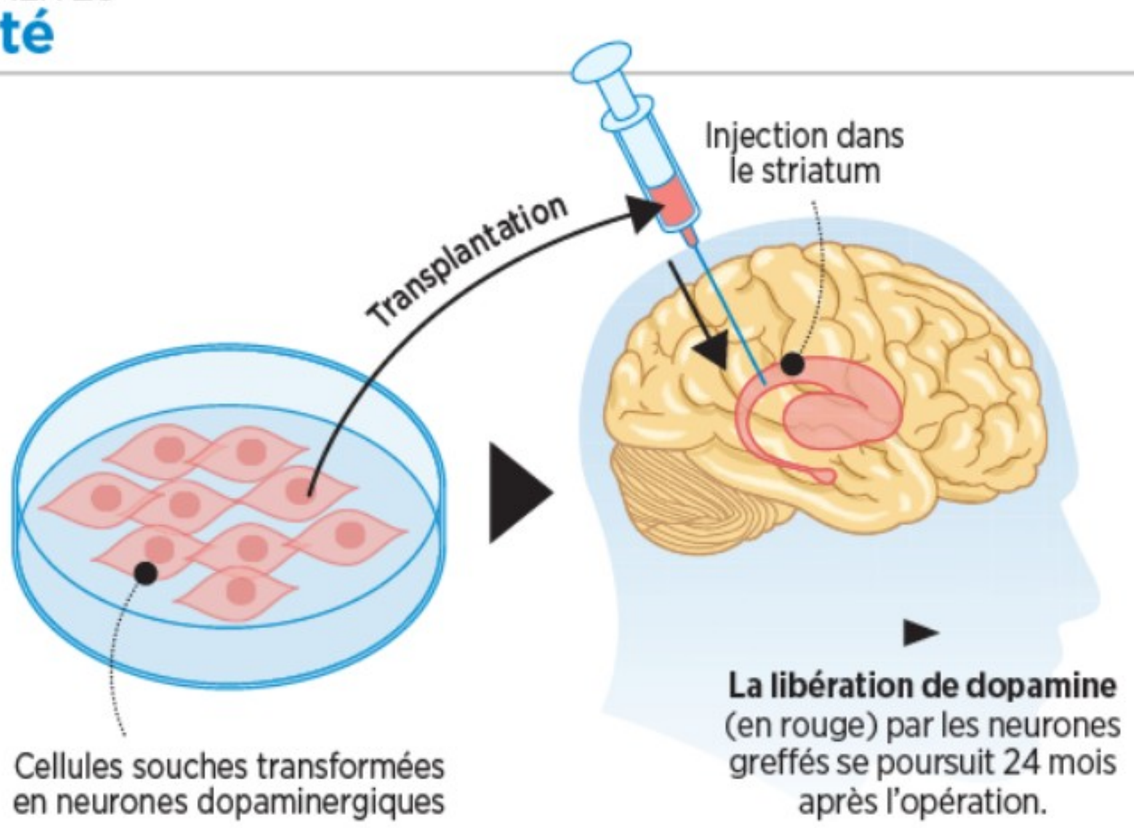
Unys c'est aussi un média accessible à toutes et tous. À travers des articles, des vidéos, des podcasts et même de la bande dessinée, il décrypte les grands enjeux de la recherche actuelle. Destiné aux curieux·ses comme aux passionné·e·s, Unys nous invite collectivement à explorer la science autrement.

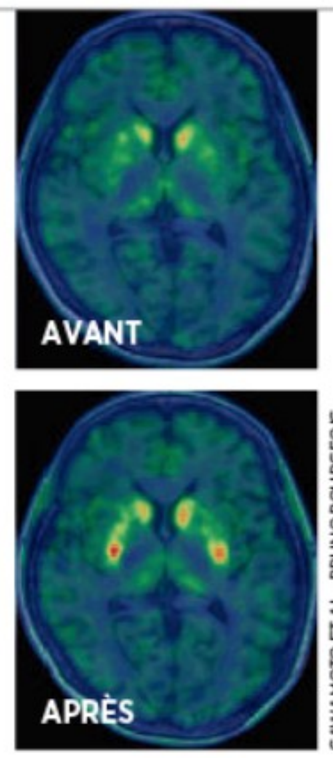
Nous sommes des aventuriers et aventurières de la connaissance. Nous repoussons les limites du savoir pour mieux comprendre le monde qui nous entoure.

Hélène Boulanger,
Présidente de l'Université de Lorraine, membre d'Unys

Plus d'infos
unys-sciences.fr

@unys_sciences
@unys-sciences





SAWAMOTO ET AL - BRUNO BOURGEOIS

Parkinson : les cellules souches à la rescousse

Des neurones producteurs de dopamine, en charge de la coordination des mouvements, ont été greffés avec succès dans le cerveau.

Deux équipes ont réalisé une prouesse similaire et quasi simultanée au Japon et aux États-Unis : greffer avec succès des neurones producteurs de dopamine à des malades de Parkinson. Cette pathologie neurologique se caractérise en effet par la perte progressive des neurones dits dopaminergiques, en charge de la coordination des mouvements. Dans les deux essais publiés ensemble dans la revue *Nature*, les neurones greffés ont été obtenus en laboratoire à partir de cellules souches modifiées. Sept patients parkinsoniens au Japon et 12 aux États-Unis, âgés de 50 à 78 ans, ont ainsi reçu entre un et cinq millions de ces cellules. Dix-huit à vingt-quatre mois après l'opération, aucun n'a souffert d'effets indésirables sérieux, et tous ont montré une amélioration significative de leurs symptômes.

Les scientifiques ont pu confirmer que les neurones greffés continuaient à produire de la dopamine. Un espoir formidable pour les malades que les deux équipes doivent désormais rendre tangible en passant par des essais cliniques incluant plus de patients. **C. G.**

À VOIR SUR LE NET

NATURE MACHINE INTELLIGENCE

Des lunettes dopées à l'IA guident les malvoyants

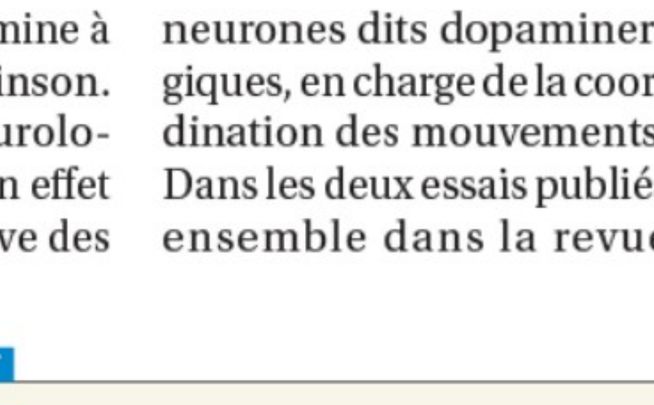
OPHTALMOLOGIE Une équipe de l'université de Shanghai (Chine) a présenté un prototype de lunettes pour malvoyant équipées d'une caméra et d'une IA. Le système enregistre toutes les 250 millisecondes les modifications de l'environnement autour de la personne, ce qui permet d'envoyer des alertes audio en temps réel pour lui permettre de changer sa trajectoire et d'éviter les obstacles. **S. R.-M.**

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

Un traitement pour empoisonner les moustiques

INFECTIOLOGIE Pour lutter contre le paludisme transmis par les moustiques, une équipe de l'école de médecine tropicale de Liverpool (Royaume-Uni) suggère d'empoisonner le sang humain dont les insectes se repaissent. Ils rapportent qu'un médicament connu, la nitisinone, rend le sang si toxique pour les moustiques qu'ils meurent quelques heures après s'en être nourris. **H. J.**

Cartographie inédite du cortex d'un mammifère


FORREST COLLMAN/ALLEN INSTITUTE

Cellules cérébrales de souris en 3D.

NEUROSCIENCE Pour la première fois, 1 mm^3 de cerveau de mammifère a été reconstruit en 3D. Cette prouesse est le fruit du Microns Project, auquel ont participé 154 chercheurs. Ils ont combiné des millions d'images en microscopie électronique du cortex visuel de souris avec des données d'activation neuronale pendant que l'animal regardait une vidéo. Ils ont ainsi décrit 200 000 cellules (neurones et autres), 523 millions de synapses et 5,4 km d'axones. Le tout représente 1,6 pétaoctet de données, soit 22 ans de vidéo HD en continu. **C. G.**

Première naissance après une FIV automatisée

BIOTECHNOLOGIES L'entreprise Conceivable Life Science a annoncé la première naissance d'un enfant conçu grâce à une fécondation *in vitro* (FIV) entièrement automatisée et pilotée par plusieurs IA. L'étude publiée dans *Reproductive BioMedicine* présente un système robotisé d'ICSI (injection du spermatozoïde dans le cytoplasme de l'ovocyte). Le robot a exécuté 23 micro-gestes, du choix du spermatozoïde jusqu'à son injection dans l'ovule. **S. R.-M.**

Télomères et longévité

En 2009, trois chercheurs américains se sont vu décerner le Prix Nobel de Médecine pour leurs travaux exceptionnels en biologie et génétique, qui ont permis la compréhension des mécanismes de protection de l'ADN au cœur des cellules.

Genèse d'une découverte

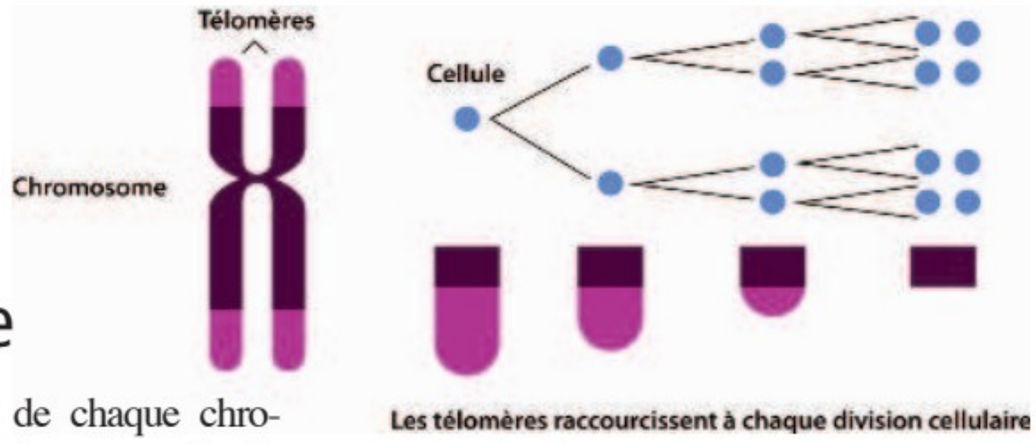
Le mot télomère vient du grec telos (fin) et meros (partie).

Dans les années 80, Elizabeth Blackburn est professeur de biologie à l'Université de Californie. Elle collabore avec Carol Greider, professeur de biologie moléculaire et Jack Szostak, professeur de génétique, afin d'étudier les mécanismes de protection et de réparation des chromosomes lors de la mitose cellulaire. Leurs travaux cherchent à expliquer comment les divisions cellulaires successives peuvent s'enchaîner sans que les chromosomes ne fusionnent entre eux ou ne s'abiment.

Mitose cellulaire et réplication des chromosomes

Les cellules de l'organisme se reproduisent régulièrement par un processus de division appelé mitose, la cellule initiale se scindant en deux cellules filles identiques qui contiennent le même matériel génétique. Il se produit pas moins de deux trillions de mitoses dans le corps humain chaque jour, ce qui permet de remplacer les cellules mortes ou abimées. Ce grand nombre fait supposer la survenue d'erreurs, c'est pourquoi les chercheurs ont émis l'hypothèse d'un système de protection des chromosomes.

Deux découvertes en une : télomères et télomérase



Les télomères raccourcissent à chaque division cellulaire

Situés aux extrémités de chaque chromosome, les télomères jouent un rôle de protection au moment de la séparation du matériel génétique. En effet à chaque division, ils raccourcissent légèrement, « sacrifiant » leur intégrité pour protéger celle des chromosomes. Le raccourcissement progressif des télomères finit par déclencher la fin du cycle de reproduction de la cellule, appelé sénescence. Les trois scientifiques ont également identifié une enzyme, baptisée télomérase, capable de rallonger les télomères et donc de prolonger la vie des cellules. Ils ont remarqué que cette enzyme n'était active que dans les cellules souches et germinales. Plus le nombre de de cellules sénescentes est grand, plus le vieillissement de l'organisme accélère : la longévité est donc directement liée à la longueur des télomères.

Astragale et télomères,

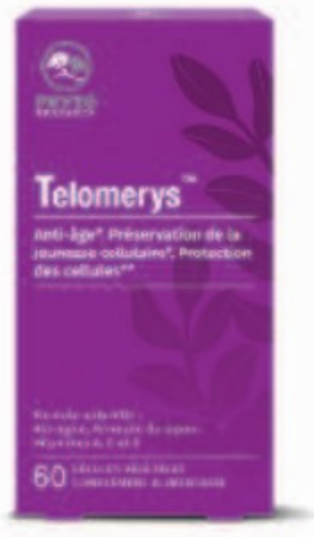
Des scientifiques se sont intéressés à la racine de l'Astragalus membranaceus, une petite fleur très utilisée en médecine traditionnelle comme tonifiant et immunostimulant. Ils ont mis en évidence que ses propriétés étaient dues à deux composés, appelés cycloastragenol et astragaloside IV, qui avaient la capacité de réactiver la télomérase dans les cellules. Après plusieurs années de développement, le laboratoire français PhytoResearch a mis au point une formule naturelle basée sur les résultats de ces avancées scientifi ques. Telomerys associe un extrait concentré de racine d'Astragalus membranaceus à du resvératrol, un puissant antioxydant, ainsi que des vitamines A, C et E. Formule anti-âge inédite, deux gélules par jour suffi sent pour constater une diminution signifi cative des rides, une amélioration des fonctions cognitives (mémoire, concentration) et un regain d'énergie.

Telomerys™

Préservation de la jeunesse cellulaire

Disponible en pharmacie

Telomerys 60 gélules végétales est disponible grâce au code ACL 602 42 56



Des conseils ?

Les experts du laboratoire PhytoResearch sont à votre écoute au **01 84 23 36 35** et sur www.telomerys.com

Le petit félin a été élevé et vénéré en Égypte ancienne bien avant sa diffusion en Europe (momie de chat datée de 672-332 avant notre ère).

GRAND PALAIS RMN (MUSÉE DU LOUVRE) / HERVÉ LEWANDOWSKI

Controverse sur la domestication du chat

Deux études sur des ADN anciens remettent en cause la chronologie de l'alliance tacite nouée entre les chats et les humains en Europe.

La domestication du chat en Europe serait bien plus tardive que ce que les scientifiques imaginaient jusqu'à maintenant. Elle se serait produite au cours des deux mille dernières années seulement. C'est en tout cas ce que soutiennent deux études — en attente de validation — menées par des équipes des universités de Rome (Italie) et d'Exeter (Royaume-Uni). Les chercheurs y proposent en effet une introduction du chat domestique (*Felis catus*) en Europe à partir de deux vagues distinctes survenues entre le IIe siècle avant notre ère et le Ier siècle de celle-ci. Une thèse très éloignée de celle avancée notamment par des spécialistes de l'ADN ancien à l'institut Jacques-Monod (CNRS/université Paris Cité) qui, entre 2017 et 2020, ont analysé le génome de plus de 250 chats couvrant une période de près de 10 000 ans. Selon eux, *Felis lybica*, une sous-espèce de chat sauvage d'Afrique et du Levant, a été domestiqué par les agriculteurs du néolithique il y a 7500 ans.

Une double introduction plus tardive en Europe

Ces félins auraient suivi la diffusion de l'agriculture en Europe dès les siècles suivants. En effet, l'accumulation de grains attirant les rongeurs aurait conduit les chats à se rapprocher des humains. Un scénario d'alliance tacite soutenu par les découvertes archéologiques, en particulier celle d'un squelette de chat trouvé dans une tombe d'enfant datant de 7500 ans avant notre ère, à Chypre. Mais pour les auteurs des deux nouvelles études, les premiers spécimens néolithiques retrouvés, dont celui de Chypre, étaient des chats sauvages locaux, hybridés avec des félins d'Afrique du Nord. D'où l'hypothèse d'une double introduction plus tardive en Europe : une première associant un chat retrouvé au Maroc avec les chats sauvages actuels de Sardaigne (Italie) ; une seconde reliant un génome ancien de Tunisie aux chats domestiques actuels. Le tout à une période d'engouement des Grecs et des Romains pour le chat égyptien issu de *F. lybica*. Celui-ci faisait déjà l'objet d'élevage en Égypte pour être momifié en hommage à la déesse Bastet lors de cérémonies religieuses. ■ **E. T.**

400 000 ans

L'âge des premiers outils en ivoire

PALÉOANTHROPOLOGIE La première utilisation connue de l'ivoire comme matériau de fabrication d'outils a été repoussée de 120 000 à environ 400 000 ans. Des traces de modifications intentionnelles ont pu être attestées sur 11 des 24 fragments récupérés sur le site paléolithique de Medzhybizh, en Ukraine. **H. J.**

SOURCE : VADIM STEPANCHUK, ACADÉMIE NATIONALE DES SCIENCES, UKRAINE.

Étonnant cas de pisciculture au Moyen Âge

ARCHÉOZOOLOGIE L'ADN ancien extrait d'une carotte sédimentaire d'un lac pyrénéen de haute altitude en Espagne révèle que des poissons auraient été introduits dans le lac par les humains dès le VIIe siècle de notre ère. Soit plus de 500 ans avant que les archives historiques ne commencent à documenter l'empoissonnement dans cette région. Aujourd'hui, le lac à la frontière espagnole abrite une population d'environ 60 000 truites fario. **H. J.**

SOURCE : E. FAGÍN, CREAF, ESPAGNE.

ALAMY/PHOTO12

Le lac Redon, situé à 2240 m d'altitude dans les Pyrénées centrales espagnoles.

Sophia Boutique, la boutique des lecteurs de SCIENCES ET AVENIR

OFFREZ OU OFFREZ-VOUS

LA PARURE

Collier & Bracelet Saphir

au prix de **49€** seulement

- Collier chaine chevrons 46 cm avec chaine d'aisance de 5 cm
- Bracelet chaine chevrons 19 cm avec chaine d'aisance de 3 cm
- Métal laiton finition doré
- Dimensions Saphir véritable traité : 6 x 4 mm
- Livrés dans un coffret et 2 pochons en feutrine
- Certificat d'authenticité
- Garantie 2 ans

BON DE COMMANDE

À compléter et à renvoyer avec votre règlement sous enveloppe affranchie à :
SOPHIA BOUTIQUE
45, avenue du Général Leclerc
60643 Chantilly Cedex

	RÉF	QTÉ	PRIX	TOTAL
La parure collier + bracelet	V213		49€	€
Frais d'envoi				OFFERTS
TOTAL DE MA COMMANDE				€

ADRESSE DE LIVRAISON

☐ M. ☐ Mme

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code Postal

Ville :

Téléphone

E-mail : @

Pour la bonne gestion de votre commande, merci d'indiquer votre email

☐ J'accepte de revoir des offres par email des partenaires de Sophia Boutique

MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Je règle par chèque à l'ordre de : **Sophia Boutique**

☐ Je règle par carte bancaire

N°

Expirant le

Signature obligatoire :

Les Éditions Croque Futur situées au 41 bis avenue Bosquet, Paris 7e, et qui éditent Sophia Boutique sont responsables de traitement et collectent des données afin de servir votre commande. Vos données pourront être transmises à d'autres organismes (presse, VAD, caritatif) et sont conservées pour une durée de 3 ans à partir de votre commande. Vous pouvez exercer vos droits d'accès, de rectification, de limitation, de portabilité, d'opposition, d'effacement au traitement de vos données et définir vos directives postmortem à l'adresse mail suivante : dpo@sophiaboutique.fr en joignant une copie de votre carte d'identité. Les Éditions Croque Futur disposent d'un délégué à la protection des données pouvant être contacté au 41 bis avenue Bosquet, Paris 7e ou à l'adresse mail dpo@sophiaboutique.fr. À tout moment vous pouvez introduire une réclamation auprès de la CNIL.

Aux origines du pont entre l'Asie et l'Afrique

En reliant les deux continents, l'élévation de la péninsule Arabique a permis l'expansion des humains et des animaux hors d'Afrique.

À l'échelle géologique, tectonique et évolution de la vie sont intimement mêlés. C'est ce que montre une étude publiée par une équipe américano-allemande dans *Nature*. Il y a 20 à 30 millions d'années, l'émergence au niveau de la croûte terrestre d'un panache magmatique, né environ 30 millions d'années plus tôt au sein du manteau, a soulevé une masse de terres qui a scindé l'ancienne mer Téthys, donnant naissance à la mer Méditerranée et à celle d'Arabie. Ce nouveau pont géologique entre l'Asie et l'Afrique, qui a mis fin à 75 millions d'années d'isolement du continent africain, a permis aux ancêtres des girafes, éléphants, rhinocéros, guépards et autres espèces, dont les premiers primates ancêtres de l'humain, de circuler entre l'Afrique et l'Asie. Cette élévation de la péninsule Arabique a également eu un impact sur la circulation océanique et le climat. Le réchauffement des océans voisins a probablement entraîné la désertification du Sahara et l'instauration d'un cycle de mousson en Asie, rendant plus humide l'Asie du Sud-Est. ■ **S. R.**

Un panache magmatique a soulevé la terre il y a 30 millions d'années, créant un pont terrestre séparant les mers d'Arabie et Méditerranée.

AKG

La longue histoire de la viticulture

PALÉOBOTANIQUE En Italie, la culture de la vigne pour faire du vin est apparue il y a plus de trois mille ans, mais elle a mis des centaines d'années à se généraliser, selon une analyse des formes de pépins recueillis sur différents sites archéologiques. Et ce n'est qu'au Moyen Âge que les formes intermédiaires encore issues de croisements disparaissent pour les pépins modernes de la vigne domestique. **P. K.**

SOURCE : MARIANO UCCHESU, UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER, FRANCE.

Les restes d'un gladiateur mordu par un lion

ANTIQUITÉ L'analyse par scan 3D de marques sur le squelette d'un probable gladiateur enterré entre 200 et 300 de notre ère, près de la cité romaine d'Eboracum, aujourd'hui York (Royaume-Uni), a révélé qu'elles correspondaient à celles d'un gros félin. Il s'agit de la première preuve matérielle directe de combats entre humains et animaux en Europe sous l'Empire romain. **S. de L.**

THE TRUSTEES OF THE BRITISH MUSEUM

Bas-relief figurant un gladiateur et un lion (Ier-IIe siècle).

SOURCE : TIM THOMPSON, UNIVERSITÉ MAYNOOTH, IRLANDE.

Une momie embaumée par le rectum

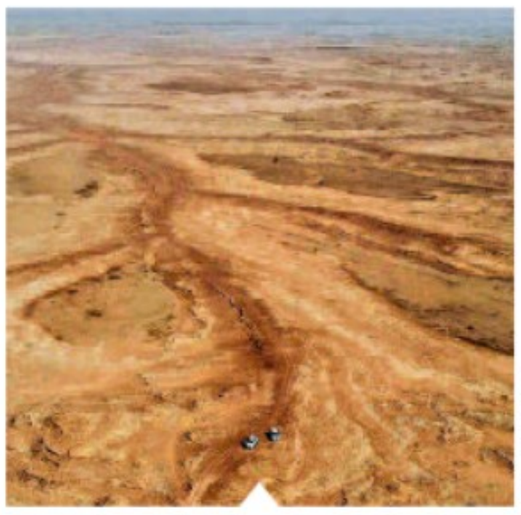
ANTHROPOLOGIE L'étude d'une momie du XVIIIe siècle découverte dans la crypte d'une église en Autriche a révélé une technique d'embaumement totalement inédite : des copeaux de bois, des tissus précieux et du chlorure de zinc ont été introduits par le rectum pour absorber les liquides corporels, sans ouvrir le corps. **E. T.**

SOURCE: ANDREAS NERLICH, UNIVERSITÉ DE MUNICH, ALLEMAGNE.

D'anciennes rivières en Arabie

PALÉOGÉOGRAPHIE Il y a 8000 ans, le désert du Rub al-Khali (Arabie saoudite) abritait des rivières et un vaste lac de près de 1100 km² et 42 m de profondeur qui a façonné la géographie de la vallée. Une étude révèle que ces points d'eau sont apparus durant l'« Arabie verte », une période de fortes précipitations qui s'est étendue de -11 000 à -5500 ans (*lire aussi* S. et A. *n° 938*). Cette mousson a transformé la région aride en savane, facilitant la migration humaine avant le retour de la sécheresse. **E. T.**

SOURCE : ABDALLAH ZAKI, UNIVERSITÉ DE GENÈVE, SUISSE


ABDALLAH ZAKI

Les traces brunes représentent les lits d'anciens cours d'eau.

LEPECO ET AL.

Ce spécimen de « fourmi infernale » était préservé dans une roche calcaire au Brésil depuis 113 millions d'années.

La plus vieille fourmi du monde

PALÉOENTOMOLOGIE ***Vulcanidris cratensis*** **est une fourmi fossile vieille de 113 millions d'années, dont le fossile a été découvert au Brésil. Ce spécimen, doté de mâchoires spécialisées en forme de faucille, appartient au groupe des « fourmis infernales » (*Haidomyrmecinae*), aujourd'hui éteint. Son ancienneté record indique une dispersion précoce des fourmis au crétacé et une capacité d'adaptation écologique étendue. J. I.**

SOURCE : ANDERSON LEPECO, UNIVERSITÉ DE SÃO PAULO, BRÉSIL.

IL A DIT

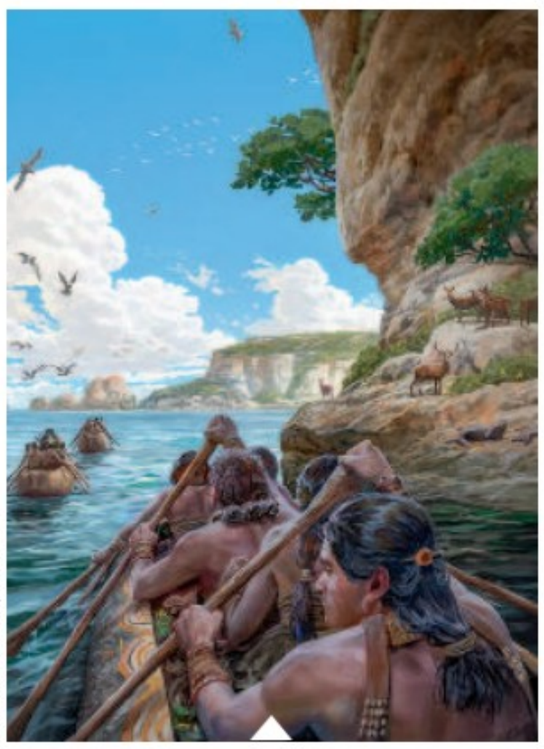
« Il est clair que le mammouth a plus d'un an car ses défenses de lait sont déjà apparues »

Maxim Cheprasov, chef du laboratoire du musée du mammouth à Iakoutsk (Russie), qui a procédé à l'autopsie de Yana, une jeune femelle mammouth dont les restes exceptionnellement bien conservés ont été découverts en décembre 2024. Sa mort remonte à environ 130 000 ans.

D'audacieux marins au mésolithique

PALÉOANTHROPOLOGIE
Des traces de présence humaine récurrente datant de -8500 ans ont été découvertes dans une grotte de l'île de Malte. Elles révèlent pour la première fois que les derniers chasseurs-cueilleurs européens étaient capables de naviguer sur la Méditerranée. Provenant vraisemblablement du sud de la Sicile, ces populations parcouraient la centaine de kilomètres les séparant de l'île à bord de simples pirogues à rame. **S. de L.**

SOURCE : ELEANOR SCERRI, UNIVERSITÉ DE COLOGNE, ALLEMAGNE.



DANIEL CLARKE / MPI GEA

Les chasseurs-cueilleurs naviguaient en pirogue sur la Méditerranée.

V. FOURNIER/NATURAGENCY ; NASA, ESA ; NETFLIX ; AKG

L'actualité se poursuit sur Internet

www.sciencesetavenir.fr - www.larecherche.fr

ÉTHOLOGIE

L'endurance des chevaux expliquée par la génétique

Les chevaux peuvent courir des heures sans épuisement grâce à une mutation génétique unique, révèle une étude publiée dans *Science*. Celle-ci aurait modifié leur gestion du stress oxydatif, expliquant leur endurance légendaire. À lire sur le site de *La Recherche*. bit.ly/940chev

CULTURE

Sciences et critiques

Livres, films, séries à la mode... Retrouvez toutes les critiques et les éditos de nos journalistes sur le site de *Sciences et Avenir*. sciav.fr/940decouvrir

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ...

2 minutes

Hubble fête ses 35 ans dans l'espace

À l'occasion de l'anniversaire du célèbre télescope spatial lancé en 1990 par la Nasa et l'Agence spatiale européenne, retrouvez quelques-unes de ses plus belles photos de l'espace. sciav.fr/940hubble

5 minutes

L'horreur technologique en série

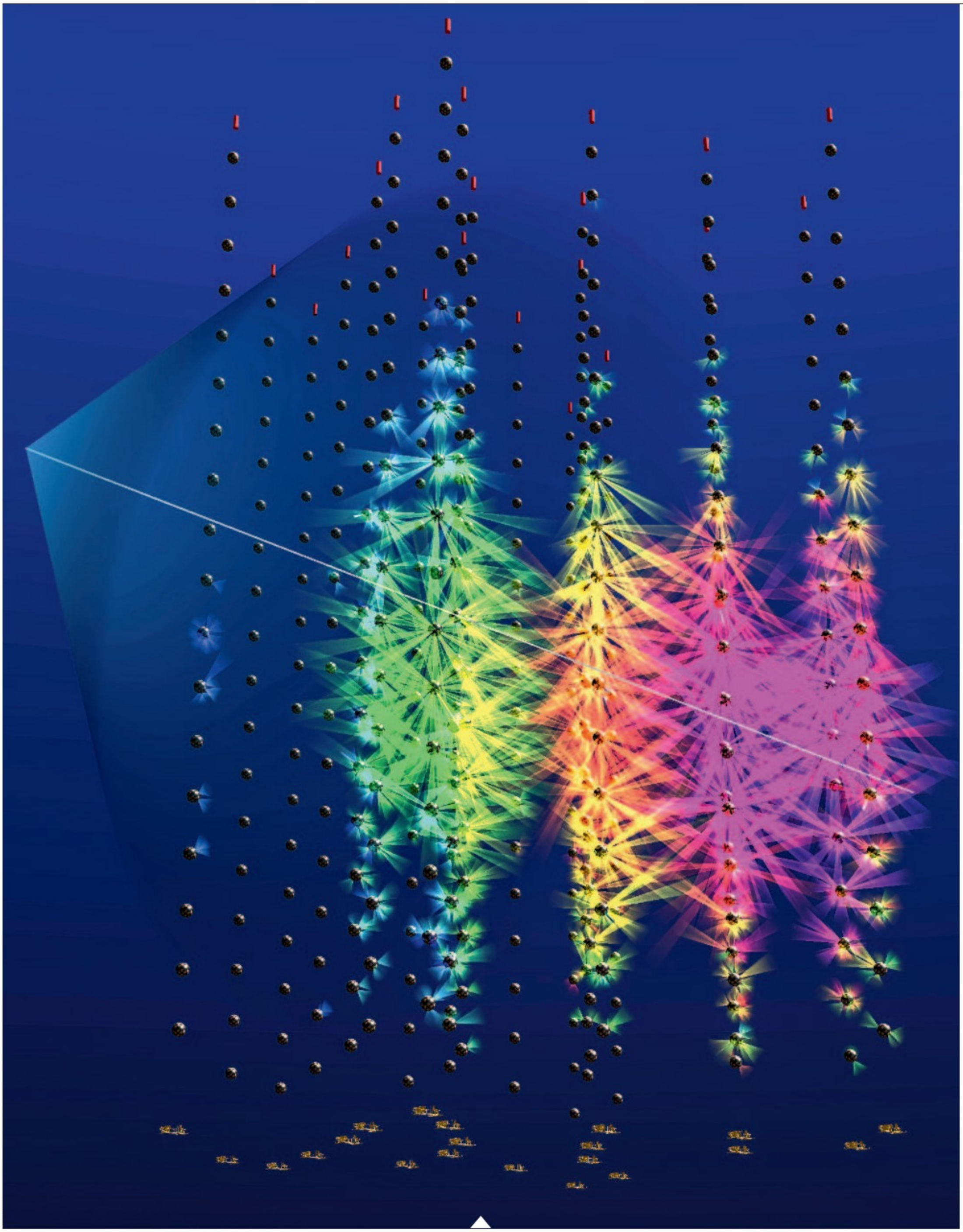
La nouvelle saison de la série *Black Mirror* (sur Netflix) revient aux récits dérangeants sur des réalités virtuelles, des interfaces cerveau-machine et autres IA douées de conscience... critique. sciav.fr/940blackm

10 minutes

La tombe du père d'Alexandre le Grand

Il est quasi certain que le roi Philippe II de Macédoine a été inhumé dans l'immense tumulus de Vergina, en Grèce. Mais dans quelle tombe exactement ? Enquête. sciav.fr/940tombe

Vous êtes plus de 2 millions à nous suivre sur Facebook



KM3NET

Vue d'artiste de la détection du neutrino énergétique par KM3NeT/Arca. La particule a traversé le détecteur selon une ligne quasi horizontale de droite à gauche, impressionnant les capteurs de lumière sur son passage.

Neutrinos

Les messagers cosmiques de l'extrême

En février 2023, le télescope sous-marin KM3NeT a détecté un neutrino d'une énergie record. Cet exploit, enfin officialisé deux ans plus tard, ouvre la voie à l'étude de phénomènes cosmiques extrêmes, et relance l'espoir de capter les insaisissables neutrinos cosmogéniques, issus de la première lumière de l'Univers.

Par Fabrice Nicot

Début février 2023, dans les profondeurs de la mer Méditerranée, les détecteurs de l'instrument KM3NeT immergé au large de la Sicile saisissent un infime éclat de lumière bleutée. Il témoigne d'un événement rarissime : la rencontre entre un neutrino de haute énergie venu du fin fond de l'espace, et le noyau d'un atome perdu dans la multitude de ceux qui constituent la Méditerranée. Pour l'équipe internationale de scientifiques qui gère l'instrument en cours de montage, c'est une divine surprise, car seulement 10 % des détecteurs sont alors installés. Commence une véritable enquête pour remonter jusqu'au messager cosmique et mesurer son énergie. « *Déterminer la direction et l'énergie de ce neutrino a nécessité un étalonnage précis du télescope et des algorithmes sophistiqués de reconstruction de trajectoire* », explique Aart Heijboer, responsable physique et logiciel de KM3NeT au moment de la détection. Car cet éclat est en réalité le fruit d'une série de réactions en cascade entre particules qu'il faut retracer pour pouvoir reconstituer la collision initiale… Après deux ans d'analyses et de calculs, le résultat est annoncé dans un article de *Nature* : ce neutrino, presque aligné avec le plan de la Voie lactée, possédait une énergie de 220 millions de milliards d'électronvolts, soit 220 pétaélectronvolts (PeV). Cela en fait le neutrino le plus énergétique jamais détecté, 30 fois plus que le précédent record…

KM3NET

Un des détecteurs de l'instrument KM3NeT.

CONSERVATION DE L'ÉNERGIE
Principe fondamental selon lequel, dans un système isolé, l'énergie totale reste constante au cours du temps, quelle que soit la transformation subie.

MODÈLE STANDARD DE LA PHYSIQUE DES PARTICULES
Théorie qui décrit toutes les particules fondamentales connues et leurs interactions, sauf la gravitation.

ONDES GRAVITATIONNELLES
Vibrations de l'espace-temps provoquées par des événements cosmiques extrêmes, comme la fusion d'étoiles à neutrons ou de trous noirs.

Si la physique des particules est morose ces temps-ci, en mal de nouvelles espèces à piéger dans ses détecteurs, les spécialistes des neutrinos ont le moral au beau fixe. D'un point de vue théorique comme expérimental, la plus légère et la plus abondante des particules de l'Univers est plus que jamais sous les projecteurs. On cherche à cerner sa masse, l'un des grands mystères du cosmos *(lire l'entretien p. 30)*. Mais aussi, *« les neutrinos sont de fantastiques sondes pour explorer l'Univers, en particulier ses phénomènes les plus extrêmes, comme les jets de matière issus des trous noirs ou les fusions d'étoiles à neutrons. La découverte de KM3NeT/Arca* [un autre détecteur, Orca, est en construction au large de Toulon] *ouvre ainsi une nouvelle fenêtre sur les phénomènes extrêmes de l'Univers »*, souligne Véronique Van Elewyck, physicienne au laboratoire Astroparticule et cosmologie de l'université Paris Cité et membre de la collaboration KM3NeT.

Mais avant de suivre sa trace dans les profondeurs de l'espace, encore faut-il remonter jusqu'à l'origine du neutrino. Rien n'est banal chez cette particule, à commencer par sa naissance toute théorique. Il fut imaginé en 1930 par le physicien autrichien Wolfgang Pauli pour résoudre un casse-tête : dans certaines désintégrations radioactives, une partie de l'énergie semble disparaître au cours de la réaction. Le phénomène en question se nomme « désintégration bêta », par laquelle un neutron d'un noyau instable se transforme spontanément en un proton, en émettant un électron. Mais à la surprise des physiciens, l'électron éjecté n'a pas toujours la même énergie. Il peut jaillir plus ou moins vite, comme si une fraction d'énergie se volatilisait, contredisant au passage un principe fondamental de la physique : la conservation de l'énergie. Wolfgang Pauli émit alors l'hypothèse qu'une autre particule, neutre électriquement, presque sans masse et quasi indétectable (puisque pas détectée à l'époque), emportait cette fraction d'énergie manquante. C'est l'acte de naissance du neutrino, « petit neutre » en italien, comme le baptise Enrico Fermi en 1933. Il fallut un quart de siècle pour prouver son existence. En 1956, Frederick Reines et Clyde Cowan détectent pour la première fois un neutrino émis par un réacteur nucléaire. Frederick Reines recevra pour cela le prix Nobel en 1995.

Une particule essentielle mais atypique

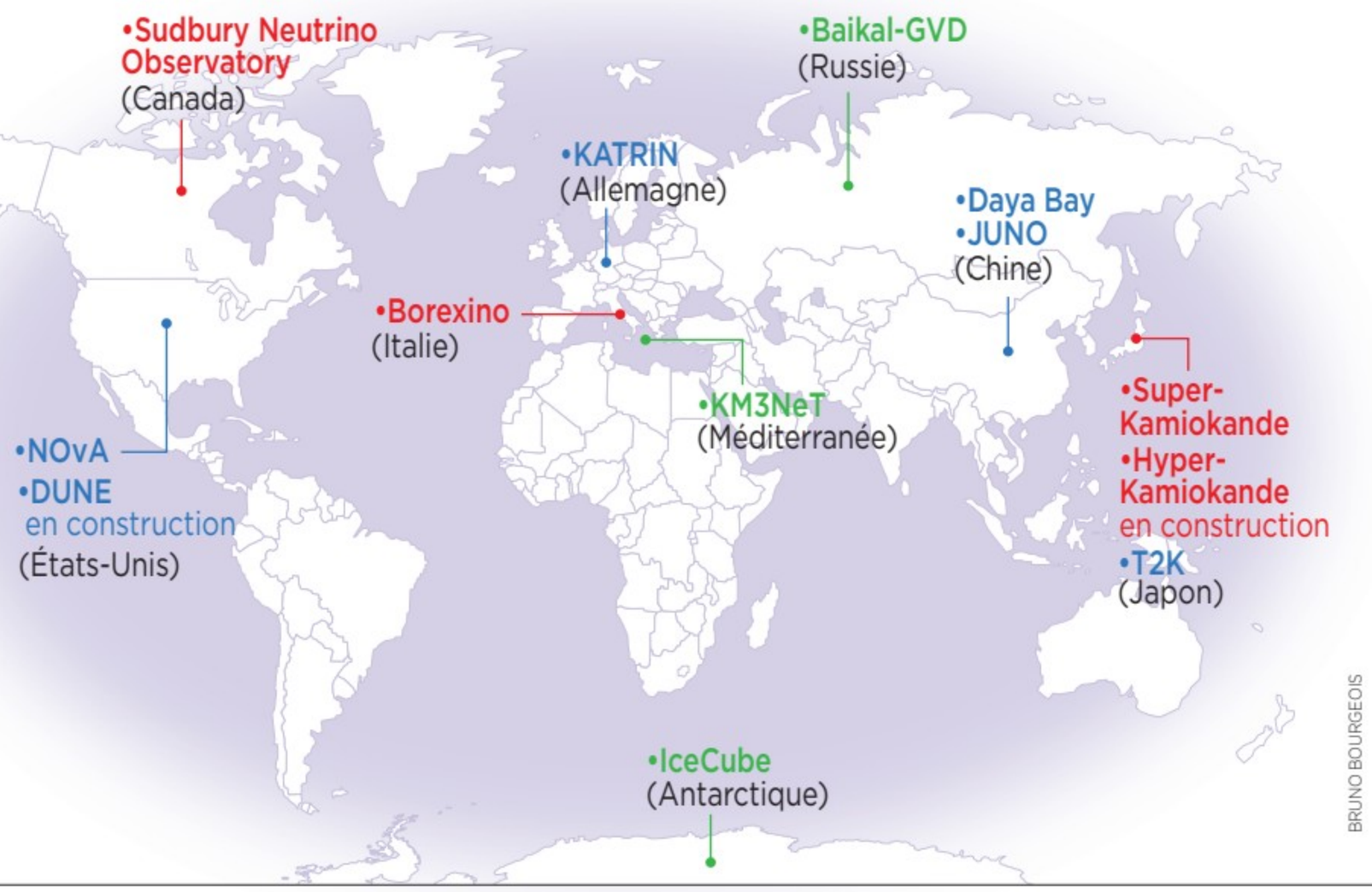
Depuis, le neutrino s'est imposé comme une particule essentielle mais atypique du modèle standard de la physique. Il en existe trois sortes ou « saveurs » — électronique, muonique et tauique —, associées respectivement à l'électron et à ses cousins plus massifs, le muon et le tau *(voir le schéma p. 30)*. Mais, contrairement à ces derniers, le neutrino n'est sensible qu'à la gravitation et surtout à l'interaction faible.

Les principaux détecteurs de neutrinos dans le monde

Détecteurs de neutrinos solaires et atmosphériques
Observer les neutrinos produits par le Soleil et les interactions des rayons cosmiques avec l'atmosphère terrestre.

Détecteurs de neutrinos d'origine astrophysique
Observer les neutrinos d'origine cosmique, notamment issus des supernovae et des objets astrophysiques extrêmes.

Détecteurs de neutrinos issus des réacteurs nucléaires et accélérateurs
Étudier les propriétés des neutrinos à partir de sources artificielles, comme les réacteurs nucléaires ou les faisceaux de neutrinos produits par des accélérateurs.



Dans cette représentation, un trou noir supermassif au cœur d'une galaxie lointaine accélère des protons (p) qui produisent des pions (π), eux-mêmes générateurs de neutrinos (ν) énergétiques et de rayons gamma (γ). Les neutrinos voyagent en ligne droite et la quasi-totalité traverse la Terre sans s'arrêter. ◄

ICECUBE-NASA

Celle-ci est l'une des quatre forces fondamentales, qui se manifeste uniquement dans le noyau des atomes. *« Les neutrinos sont les seules particules qui n'interagissent que par l'interaction faible. Ils peuvent ainsi traverser des milieux très denses, sans être ni déviés ni absorbés »*, note Véronique Van Elewyck.

Parfois, les neutrinos s'arrêtent malgré tout. Il arrive, très rarement, qu'un de ces messagers entre en collision avec un atome. Plusieurs techniques permettent alors d'enregistrer leur passage. Certains détecteurs utilisent des cristaux ou des gaz, sensibles à l'énergie déposée lors de ces interactions infimes. Mais pour les neutrinos de très haute énergie, comme celui capté par KM3NeT, la méthode est différente. En février 2023, lorsque le neutrino de saveur muonique a interagi avec un noyau, il a produit un muon. Ce muon s'est trouvé propulsé à une vitesse dépassant celle de la lumière dans l'eau (mais pas dans le vide, indépassable). Il a alors engendré une lumière bleutée, analogue au « bang » supersonique, mais dans l'optique et l'ultraviolet. C'est l'effet Tcherenkov, détaillé par l'ingénieur soviétique Pavel Tcherenkov dans les années 1930. Seule cette lueur fugace, saisie et amplifiée par les capteurs photoniques de KM3NeT, trahit le passage du neutrino.

La majorité des neutrinos détectés sur Terre proviennent de sources connues : réactions nucléaires dans le Soleil, réacteurs nucléaires civils… Jusque dans l'atmosphère, où ces particules sont produites en cascade lorsque des rayons cosmiques frappent les noyaux d'atomes, créant des gerbes de particules instables (pions, kaons), qui se désintègrent à leur tour en émettant des neutrinos. Leur énergie reste modeste, de l'ordre du million au milliard d'électronvolts. Ils sont toutefois traqués dans de nombreux détecteurs, où l'on étudie leur masse ou leur capacité à osciller entre leurs trois différentes saveurs.

Si l'on monte en énergie, on bascule dans la catégorie des neutrinos ultra-énergétiques. Ces particules-là ne naissent pas dans des environnements ordinaires. Elles sont issues de processus astrophysiques extrêmes, là où la matière est broyée, accélérée jusqu'à des vitesses proches de la lumière. *« C'est le cas des noyaux actifs de galaxies : des trous noirs gigantesques qui accrètent la matière environnante sous la forme d'un disque, ce mécanisme éjectant aussi de la matière dans l'espace sous forme de jets de particules. Ces phénomènes constituent de bons sites de production de neutrinos »*, explique Véronique Van Elewyck.

À la recherche des neutrinos cosmogéniques

Plus généralement, tout environnement dense où des noyaux très énergétiques circulent peut générer des neutrinos : parmi ceux-ci, les éjections de matière et de rayonnement provoquées par la fusion d'étoiles à neutrons ou par certaines explosions en supernovae, communément appelées sursauts gamma. *« Si des noyaux chargés sont accélérés à de grandes énergies, il y aura une émission de neutrinos dans l'environnement proche de la source, où il y a beaucoup de matière en général »*, détaille la chercheuse. Il reste à associer formellement les neutrinos à ces événements violents grâce à l'astronomie « multi-messagers », en joignant leur détection à un signal dans le domaine électromagnétique (optique, rayons gamma, X…), ou l'émission d'ondes gravitationnelles. ▶

VÉRONIQUE VAN ELEWYCK

« Les neutrinos sont de fantastiques sondes pour explorer les phénomènes les plus extrêmes de l'Univers »

Véronique Van Elewyck, physicienne au laboratoire Astroparticule et cosmologie de l'université Paris Cité

E+P DU FOU

ENTRETIEN

MICHEL GONIN

DIRECTEUR DU LABORATOIRE INTERNATIONAL ILANCE (IN2P3 – UNIVERSITÉ DE TOKYO)

« On a longtemps cru que les neutrinos étaient dépourvus de masse »

Pourquoi s'intéresser à la masse des neutrinos ?
Parce que l'on a longtemps cru qu'ils en étaient dépourvus, à l'image du photon. Cela s'intégrait bien au modèle standard de la physique des particules qui ne leur imposait pas de masse. Mais cette vision a basculé en 1998, avec la découverte des oscillations de neutrinos. Ces dernières impliquent nécessairement une masse non nulle. Autrement, un neutrino resterait figé dans son état d'origine. Or ce n'est pas ce que l'on observe.

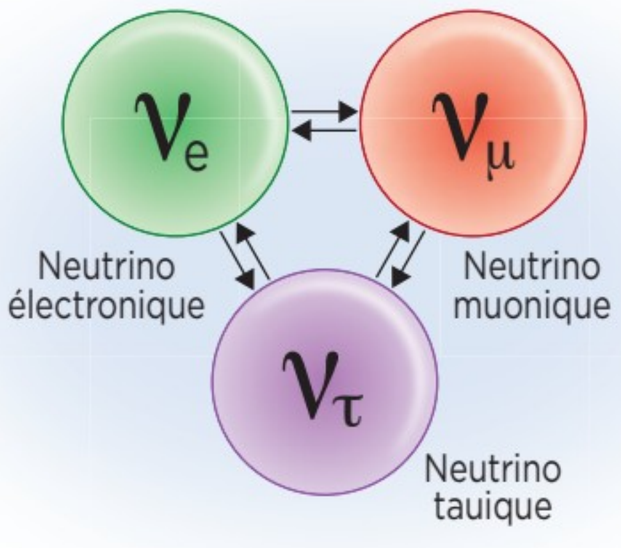
Que signifie « l'oscillation » des neutrinos ?
Lorsqu'un neutrino est émis, il n'a pas une identité fixe. Il est une superposition des trois états possibles, électronique, muonique et tauique, où chacun peut dominer les autres.
Un neutrino d'abord électronique peut ainsi se transformer en muonique ou tauique. Ce n'est qu'au moment de la détection que l'on connaît formellement son identité, qui se fige alors. Ce comportement étrange est une manifestation directe de la physique quantique.

En quoi ces oscillations intéressent-elles la physique fondamentale ?
Elles permettent par exemple d'explorer les différences de comportement entre la matière et l'antimatière.
Si les neutrinos et les antineutrinos n'oscillent pas exactement de la même manière, cela pourrait contribuer à expliquer pourquoi l'Univers est constitué presque exclusivement de matière, alors qu'il aurait dû produire autant d'antimatière que de matière au moment du Big Bang.

Vous travaillez au Japon sur Hyper-Kamiokande, une expérience monumentale…
C'est le successeur de Super-Kamiokande, où ont été observées les oscillations pour la première fois. Hyper-Kamiokande est une version huit fois plus grande dévolue à l'étude des neutrinos, mais aussi à la désintégration du proton. La cuve, à 650 m sous terre, pourra contenir un volume équivalent à 1,5 fois celui de Notre-Dame de Paris.
Les premières données sont attendues pour 2028.

Propos recueillis par F. N.

▸ Cela n'a été fait que dans de très rares cas pour le moment.
Mais certains neutrinos de haute énergie pourraient provenir d'un phénomène plus diffus, à l'échelle de l'Univers tout entier, là où des rayons cosmiques ultra-énergétiques croisent la lumière la plus ancienne du cosmos. Ce sont les neutrinos cosmogéniques. Ils seraient engendrés lorsque des protons ou noyaux très énergétiques (issus par exemple de supernovæ) entrent en collision avec les photons du fond diffus cosmologique — cette lumière fossile émise 380 000 ans après le Big Bang. De cette rencontre naissent des neutrinos d'une énergie colossale, capables de traverser l'Univers sans jamais dévier. Mais pour l'instant, leur existence reste théorique.
« On s'attend à voir un maximum de ces flux aux alentours de 100 PeV, ce qui rentre dans la fenêtre de détection de KM3NeT », se réjouit la physicienne. Le neutrino détecté par KM3NeT pourrait ainsi constituer le premier témoin direct de ce processus. Mais il est encore trop tôt pour écarter d'autres hypothèses, comme un neutrino issu d'un événement cosmique violent de type supernovae. Pour qu'un neutrino puisse être classé comme cosmogénique, encore faut-il qu'il s'inscrive dans un flux réparti de manière uniforme sur la sphère céleste, comme l'est le fond diffus cosmologique. Or, l'événement de février 2023 reste isolé. *« Mais cela va changer,* espère Véronique Van Elewyck. *D'abord, parce que le déploiement de notre instrument se poursuit. On espère qu'il sera terminé en 2030. Il occupera alors un volume de 1 km³ et comptera 200 000 photodétecteurs. »* Par ailleurs, il bénéficiera du renfort d'Icecube, en fonctionnement en Antarctique depuis 2010, qui devrait s'agrandir dans les prochaines années, dans le cadre du programme Gen2. Le volume du détecteur de 1 km³ sera multiplié par huit, ce qui le rendra d'autant plus sensible aux neutrinos cosmogéniques. « Le petit neutre » n'a donc pas fini d'enthousiasmer les astrophysiciens qui le traquent depuis le fond des mers jusque dans leurs laboratoires. ■



Un neutrino oscille en permanence entre trois états différents (saveurs). Il se fige dans un état particulier lorsqu'il est observé.

BRUNO BOURGEOIS

PROFITEZ D'UNE REMISE DE 20%
SUR L'ACHAT DE VOTRE TICKET AVEC LE CODE **SA-VT25**

VIVA TECHNOLOGY

11-14 JUIN 2025

THE PLACE TO B2B*.

+400 intervenants du monde entier. Des idées innovantes.
Les meilleurs insights** business du moment.
Ayez un temps d'avance à VivaTech.

ARTHUR MENSCH
PDG
MISTRAL AI

VANESSA WYCHE
ADMINISTRATRICE ASSOCIÉE
NASA

ALAIN ASPECT
PROFESSEUR ET GAGNANT
DU PRIX NOBEL DE PHYSIQUE
CNRS / PASQAL

*Le lieu pour faire du business **perspectives

RÉSERVEZ VOTRE TICKET
SUR **VIVATECH.COM**

PARIS
PORTE DE VERSAILLES

CO-ORGANISATEURS

PUBLICIS GROUPE
Groupe Les Echos Le Parisien

PARTENAIRES MÉDIAS

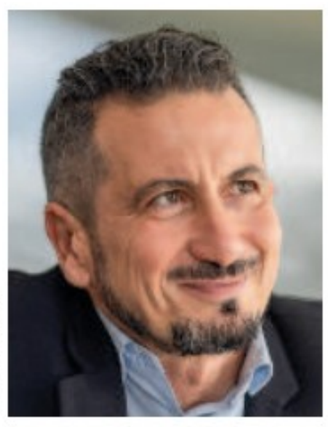
franceinfo: · 20minutes · france.tv · webedia · BFM BUSINESS
africa news. · euro news. · Bloomberg Media · CNN · FT FINANCIAL TIMES · rfi · FRANCE 24 · MCD · France médias monde

Ces innovations pour rendre l'avion plus sobre

En attendant l'avion à hydrogène et ses promesses de vol décarboné, l'industrie aéronautique développe de nouvelles technologies : moteurs sans carène, ailes pliables, biocarburants… Tour d'horizon de ces innovations à l'occasion du salon du Bourget qui se tient en juin.

La prochaine révolution dans l'aviation civile viendra de l'hydrogène… Mais pas tout de suite… Celui qui le symbolise le plus, le programme ZEROe (pour zéro émission) d'Airbus, devait prendre son envol en 2035 mais il a été repoussé d'une dizaine d'années ! Le projet reste pour autant *« au cœur de la feuille de route »*, martèle l'avionneur, qui explique que si les cinq dernières années ont permis à ses ingénieurs de savoir comment fabriquer un avion à hydrogène qui fonctionne, le lancer trop vite reviendrait à faire un « Concorde de l'hydrogène » en proposant une solution commercialement non viable. Ainsi, il a été décidé d'ajuster le calendrier hydrogène *« à la maturité de l'écosystème et des technologies »*, soit à un accès à la ressource en quantité et à un prix raisonnable — lequel ne se fera pas sans *« une collaboration et des investissements à l'échelle mondiale »*. Un dernier point sur lequel insiste Karim Mokaddem, responsable recherche et technologie des avions commerciaux de demain chez Airbus : *« Si on veut réussir la décarbonation pour 2050, cela requiert un jeu collectif, incluant avionneurs mais aussi politiques et acteurs des différentes filières. »*

Dans l'immédiat, Airbus se recentre sur l'avion de demain, son futur monocouloir, le successeur de l'A320. Leader mondial du marché, l'avionneur joue gros et doit réussir à accoucher d'un modèle immédiatement fiable et rentable pour les compagnies clientes, sous peine de voir Boeing prendre les devants pour longtemps. Pour donner naissance à ce futur *best-seller* — qui devra notamment atteindre la neutralité carbone promise par le secteur aérien à l'horizon 2050 —, il explore différentes briques technologiques à la maturité variable. Propulsion, aérodynamisme, matériaux… L'avion de demain aura-t-il des moteurs décarénés ? Des ailes pliables ? Une structure faite de composites inédits ? Il est trop tôt pour l'affirmer : l'avionneur s'est donné jusque vers 2030 pour arrêter ses choix technologiques, tablant sur une entrée en service vers 2035 d'un appareil de 20 à 30 % plus économe en énergie que ses prédécesseurs. Revue de détails des solutions envisagées.



AIRBUS 2025

« Si on veut réussir la décarbonation pour 2050, cela requiert un jeu collectif incluant avionneurs, politiques et acteurs des filières »

Karim Mokaddem, responsable recherche et technologie des avions commerciaux de demain chez Airbus

Le turboréacteur non caréné de CFM, une coentreprise de Safran et General Electric, est conçu pour permettre des vols avec une réduction de 20 % des émissions de CO_2 et de la consommation de carburant. Sa mise en service est annoncée pour 2035 (vue d'artiste).

SAFRAN / CFM INTERNATIONAL

Propulsion : un moteur décaréné

C'est la brique technologique la plus avancée, déjà testée en soufflerie à échelle réduite et annoncée pour 2035. Compatible avec l'ensemble des carburants durables, il s'agit d'un rotor hybride et surtout décaréné. Pourquoi décaréné ? Il faut avant tout se rappeler qu'avec le cycle thermodynamique, la taille de leur soufflante est le principal levier de l'efficience des turboréacteurs. Or, qui dit grande soufflante — déjà près de deux mètres de diamètre sur les moteurs de dernière génération —, dit inflation sur la taille des réacteurs eux-mêmes, dont certains touchent presque le sol aujourd'hui. La technologie « open fan » apparaît ainsi comme une solution prometteuse pour augmenter la taille des pales de la soufflante, jusqu'à la doubler, sans avoir besoin d'ajouter une nacelle élargie.

Au cœur de la recherche et développement en matière de propulsion sobre, ce turboréacteur disruptif pourrait faire la différence avec une réduction annoncée de 20 % de consommation de carburant et d'émissions de CO_2 par rapport aux modèles actuels les plus vertueux. Développé dans le cadre du programme Rise (Revolutionary innovation for sustainable engines) de CFM (Safran et General Electric), il semble avoir les faveurs d'Airbus, comme en témoigne l'esquisse dévoilée lors du sommet annuel de l'avionneur, en avril. À noter que l'on ne le retrouve pas pour l'instant chez Boeing dans son projet X-plane appelé à succéder au 737.

L'idée d'un retour au décaréné n'est pas récente. Les premières études ont commencé dans les années 1980, mais un prix du pétrole relativement bas et des contraintes environnementales sans commune mesure avec les exigences actuelles n'avaient pas encouragé la commercialisation de tels moteurs. Car les « open fan » apportent leur lot de contraintes et, à l'image de toute innovation disruptive, de risques. Ainsi, côté acoustique, Airbus a déjà prévu de s'appuyer sur une soufflante qui tournera trois fois moins rapidement que les modèles actuels, notamment pour compenser l'absence d'enveloppe dont l'un des mérites était d'atténuer le bruit. Côté sécurité, l'avionneur travaille à protéger les contacts accidentels avec les pales — sans préciser encore comment, mais probablement pas par un blindage qui aurait l'inconvénient d'ajouter de la masse. Si le choix de la technologie « open fan » est finalement confirmé, il aura aussi des conséquences sur l'architecture du futur monocouloir et pas des moindres : les avionneurs devront en effet trouver une place à ces moteurs d'une envergure inédite. Ils envisagent ainsi de les déplacer sous des ailes rehaussées ou

bien carrément à l'arrière, comme on peut le voir sur les appareils de transport régionaux.

Aérodynamisme : une voilure intelligente et rétractable

Inspirés par le vol des oiseaux, et par la théorie qui donne une traînée induite nulle sur une aile infinie, les ingénieurs voient long, toujours plus long ! Dans les équipes d'UpNext, le laboratoire d'innovation d'Airbus, ils travaillent à concevoir une voilure allongée afin de jouer sur le ratio entre la largeur (ou corde) moyenne et la longueur (l'envergure) pour obtenir une meilleure portance et réduire la traînée que celle-ci induit. *« Sur un Airbus conventionnel, ce ratio varie de 10 à 11,* explique Sébastien Blanc, directeur technique du projet. *Avec le démonstrateur eXtra performance Wing, il pourrait atteindre 17.* » Soit, pour un A320, un allongement de l'ordre de 14 mètres pour une aile actuelle de 36 mètres ! Bien au-delà des bouts d'aile recourbés (*winglets*) déjà présents sur les modèles actuels.
Mais pour tenir la promesse de gagner de 5 % à 10 % sur la consommation de carburant, il faudra encore relever quelques défis, à commencer par la gestion du surplus de charge aérodynamique induit par une structure alourdie. Les ingénieurs ont ainsi prévu une charnière intelligente à la jonction, capable de se relâcher au besoin pour faire oublier la présence de la voilure additionnelle en ne transmettant pas au reste de la structure les efforts qui s'exercent sur elle. Pour optimiser les phases de vol et résister aux turbulences, ils ont par ailleurs équipé les ailes de nouvelles surfaces de contrôle à même de réagir de manière autonome à des capteurs de rafales. Comme des survolets ou encore des aérofreins de type *pop-up* capables de se déployer en temps réel, à la manière dont un oiseau adapterait la surface de ses plumes au vent.
Placés sur le nez de l'avion, d'autres capteurs, de type lidar, viendront également sonder l'atmosphère jusqu'à 200 mètres en amont de l'appareil afin de détecter les turbulences (cisaillement du vent, tourbillons de sillage, etc.) avant que l'avion ne les traverse. Transmises au calculateur, ces informations permettront aux pilotes d'adapter leur voilure ou trajectoire en temps réel.
Reste à s'assurer que ces avions d'une envergure inédite restent compatibles avec les infrastructures aéroportuaires existantes. *« Le but est de conserver l'empreinte au sol actuelle en rabattant le bout de voilure à 90° grâce à la charnière »*, explique l'ingénieur. Ces ailes d'un genre nouveau seront testées en vol à l'échelle 1/3 sur un démonstrateur, un Cessna modifié, d'ici moins d'un an.

L'aile allongée de ce démonstrateur de l'Airbus Albatross peut se replier à l'extrémité afin d'alléger la charge et d'améliorer les performances de l'avion.

Matériaux : des plastiques à la place du métal

Dans la chasse au gain de poids, l'aéronautique remplace depuis longtemps une partie des pièces métalliques de ses appareils par des plastiques renforcés de fibres de carbone (PRFC) — jusqu'à 50 % de la masse des structures principales déjà aujourd'hui. Thermodurcissables ou thermoplastiques selon la résine employée, leur excellent rapport résistance/poids participe à l'amélioration des performances des avions mais aussi de leur rendement énergé-

BONNES PRATIQUES

Optimiser les opérations en vol et au sol

Outre les briques technologiques, l'amélioration des opérations en vol et au sol est une carte à jouer significative puisqu'elle peut participer à la décarbonation du transport aérien à hauteur de 5 à 10 %. En vol, les ingénieurs explorent une adaptation plus fine du pilotage aux conditions météorologiques et à la masse de l'appareil, une approche plus fluide lors des phases de décollage et d'atterrissage, une gestion plus globale pour fluidifier le trafic aérien… Au sol, c'est notamment la part de l'alimentation électrique croissante qui pourrait changer la donne : durant le stationnement (pour la climatisation ou le chauffage) ou lors des phases de roulage — jusqu'à 40 minutes pour les « méga hubs ».

AIRBUS

tique, avec une réduction de 20 % de la consommation de carburant par rapport aux générations précédentes. Le premier long-courrier à avoir adopté cette solution est le Boeing 787, mis en service en 2009.

Mais, en raison de processus de fabrication encore essentiellement manuels et de temps de durcissement très longs, la production des pièces aéronautiques issues de ces matériaux composites est loin du rendement industriel attendu. Ainsi, les services de recherche et technologie mettent l'accent sur de nouveaux procédés à même d'accélérer les cadences. Le français Daher teste par exemple de nouvelles résines thermodurcissables « fast-cure » avec la promesse d'*« une pièce toutes les 25 minutes contre 7 heures avec les résines actuelles »*.

Quant aux thermoplastiques, pour l'instant cantonnés aux pièces non critiques et peu chargées, ils devraient être majoritaires sur l'avion de demain. Au nombre de leurs atouts dans la quête d'un avion plus durable, une production moins énergivore — stockés à température ambiante alors que les thermodurcissables nécessitent d'être congelés —, ils sont aussi plus rapides à mettre en forme et d'une recyclabilité élevée. Alors que les thermodurcissables durcissent définitivement, les thermoplastiques peuvent en effet être réchauffés pour être réparés ou remodelés. Mieux encore, les pièces issues de ces composites peuvent être assemblées par soudure par induction, une solution prometteuse qui permettrait notamment de se passer du traditionnel assemblage par rivets, avec gain de poids et de budget à la clé.

Ne manque plus que la maturité nécessaire pour produire des pièces complexes ou de grande taille afin d'envisager ces thermoplastiques au-delà de la voilure, pour des pièces plus structurelles, par exemple pour le mât moteur ou même le fuselage de l'avion de demain. Parmi les pièces réalisées grâce à cette technologie figure le cadre d'admission d'air d'un démonstrateur de moteur développé en partenariat avec Airbus. D'une circonférence de plusieurs mètres, cette pièce, composée de quatre profilés assemblés, est l'une des plus grandes jamais réalisées en thermoplastique.

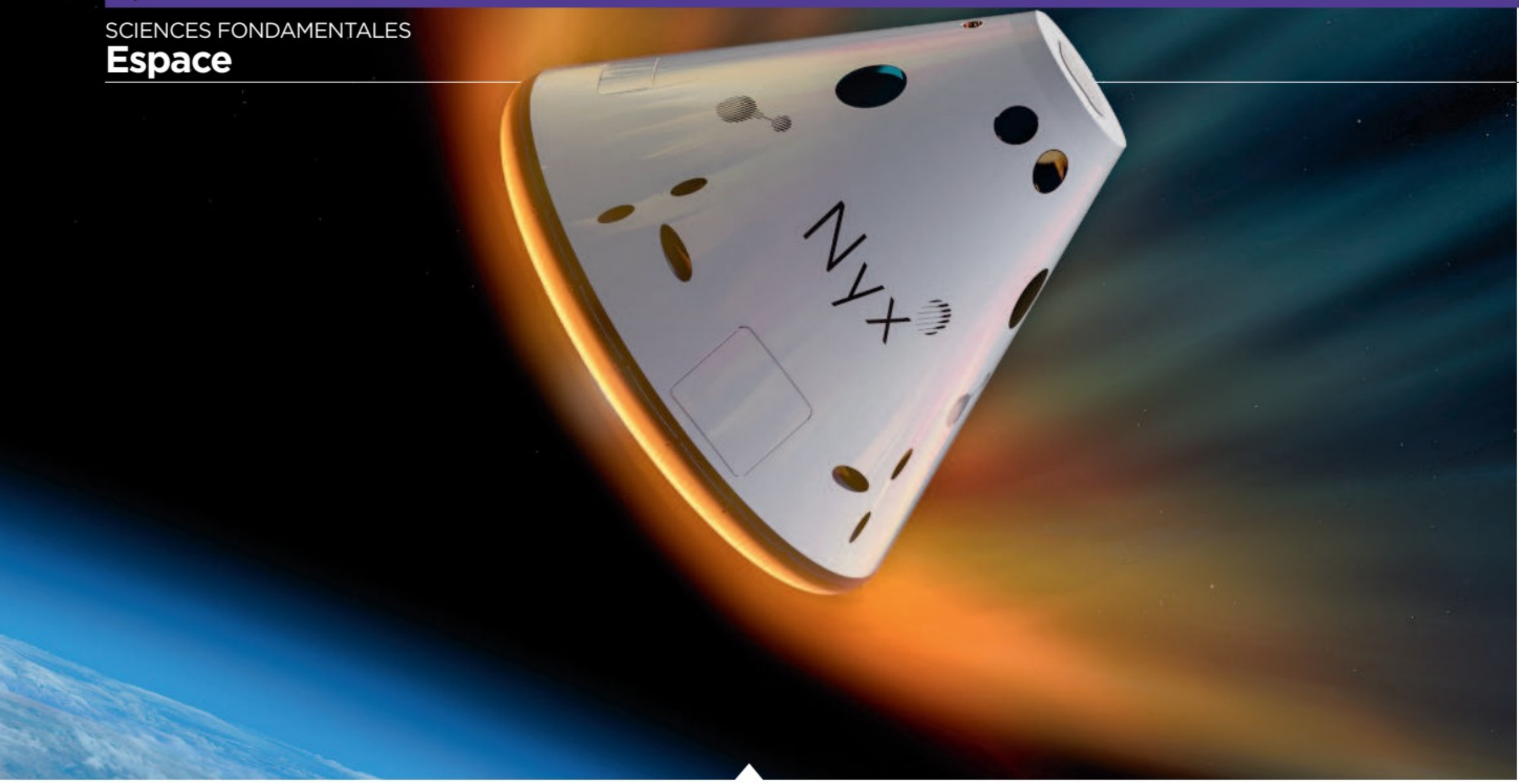
En matière de composites, le développement de l'impression 3D constitue également une piste pour contribuer à réduire la masse des pièces. Les processus de cette fabrication additive consistent à ajouter la quantité de matière seulement nécessaire au lieu d'en retirer d'une forme préexistante, ce qui génère en sus moins de déchets à la source. Tout un fuselage a ainsi été réalisé par Airbus dans le cadre de la plateforme Large Aircraft de Clean Sky 2. Et l'avionneur explore également des alternatives aux PRFC plus durables, comme des fibres issues de la biomasse et des résines provenant du sucre de canne, ou encore des manières de séparer les fibres de carbone des résines pour mieux les recycler. Enfin, au-delà de ces challenges technologiques, reste un défi de taille : faire baisser des coûts de production qui demeurent élevés. ■

Natacha Scheidhauer

NOUVELLES ÉNERGIES

Les promesses des biocarburants

En attendant l'hydrogène, les avionneurs misent sur les carburants d'aviation durables (CAD ou SAF). Divisés en biocarburants et carburants de synthèse en fonction de la source du carbone et de l'hydrogène qui les composent, ils permettent de réduire jusqu'à 90 % des émissions de CO_2 et devront remplacer 70 % du kérosène en 2050, selon le règlement européen ReFuel EU Aviation. Un défi de taille : aisément compatibles avec les moteurs actuels, ils représentent pour l'instant moins de 0,1 % de la consommation aérienne mondiale. La raison ? Un coût prohibitif — 3 à 4 fois le prix de la tonne de kérosène pour les biocarburants et 4 à 10 fois pour les carburants de synthèse —, une biomasse limitée pour les premiers et un manque de maîtrise des technologies pour les seconds empêchent les filières de passer à l'échelle industrielle. *« On estime que les biocarburants pourront couvrir la moitié du kérosène à remplacer en 2050, soit 200 millions de tonnes,* explique Nicolas Jeuland, expert en carburants innovants chez Safran. *Il faudra donc jouer sur la complémentarité des filières pour le reste des besoins, notamment avec les carburants issus de l'électricité bas carbone (e-fioul et potentiellement hydrogène).* » Grâce aux batteries constituées d'un électrolyte solide à la densité énergétique prometteuse, l'électrification des fonctions essentiellement non propulsives pourrait aussi participer à la décarbonation — au mieux de 5 %.



Le véhicule spatial qui sera encapsulé dans la coiffe de la fusée Falcon 9 pourra à terme s'arrimer à n'importe quel vaisseau pour acheminer du matériel en orbite terrestre basse (vue d'artiste).

La capsule Nyx, fer de lance du fret spatial européen

La start-up franco-allemande The Exploration Company veut faire entrer le spatial européen dans une nouvelle ère : celle du transport cargo modulable et réutilisable. Reportage dans la banlieue de Munich, en Allemagne, avant le lancement prévu courant juin.

L'Europe bientôt de retour dans l'aventure du fret spatial ? C'est en tout cas l'ambition de la start-up franco-allemande The Exploration Company. Ce mois de juin, sa capsule Nyx prendra place sur une fusée Falcon 9 de SpaceX et sera envoyée en orbite basse pour la première fois. Si tout se passe bien, ce véhicule cargo pourra acheminer du matériel en orbite terrestre basse, vers la Lune et peut-être au-delà. Surtout, et c'est inédit, la capsule pourra être réutilisée jusqu'à dix fois. De quoi affranchir les Européens de leur dépendance à la capsule Dragon de l'américain SpaceX tout en prenant une longueur d'avance technologique.

Pour l'heure, cette première mission doit permettre de montrer que Nyx est bien capable de voyager. « *Il s'agit de tester le bouclier thermique — qui doit supporter des températures extrêmes, jusqu'à 3000 °C générées par la friction de l'atmosphère —, les parachutes et amerrir en toute sécurité* », explique Victor Maier, responsable des affaires pour l'Allemagne et l'Europe centrale chez The Exploration Company, devant la

capsule en préparation dans un hangar situé dans la banlieue de Munich (Allemagne).
Quelques jours avant son départ pour le pas de tir, l'équipe d'ingénieurs s'affaire autour du vaisseau spatial, au milieu d'une salle stérile. Un endroit dans lequel ne pénètrent que ceux autorisés à travailler sur les derniers réglages. Pas de photo, pas de vidéo, pas de nourriture ni de boissons. En blouse blanche, surchaussures aux pieds et charlotte sur la tête, une vingtaine d'ingénieurs fourmillent dans le grand hangar immaculé. Certains pianotent sur des ordinateurs, d'autres inspectent scrupuleusement la capsule, en enjambant avec une infinie précaution les câbles scotchés au sol.

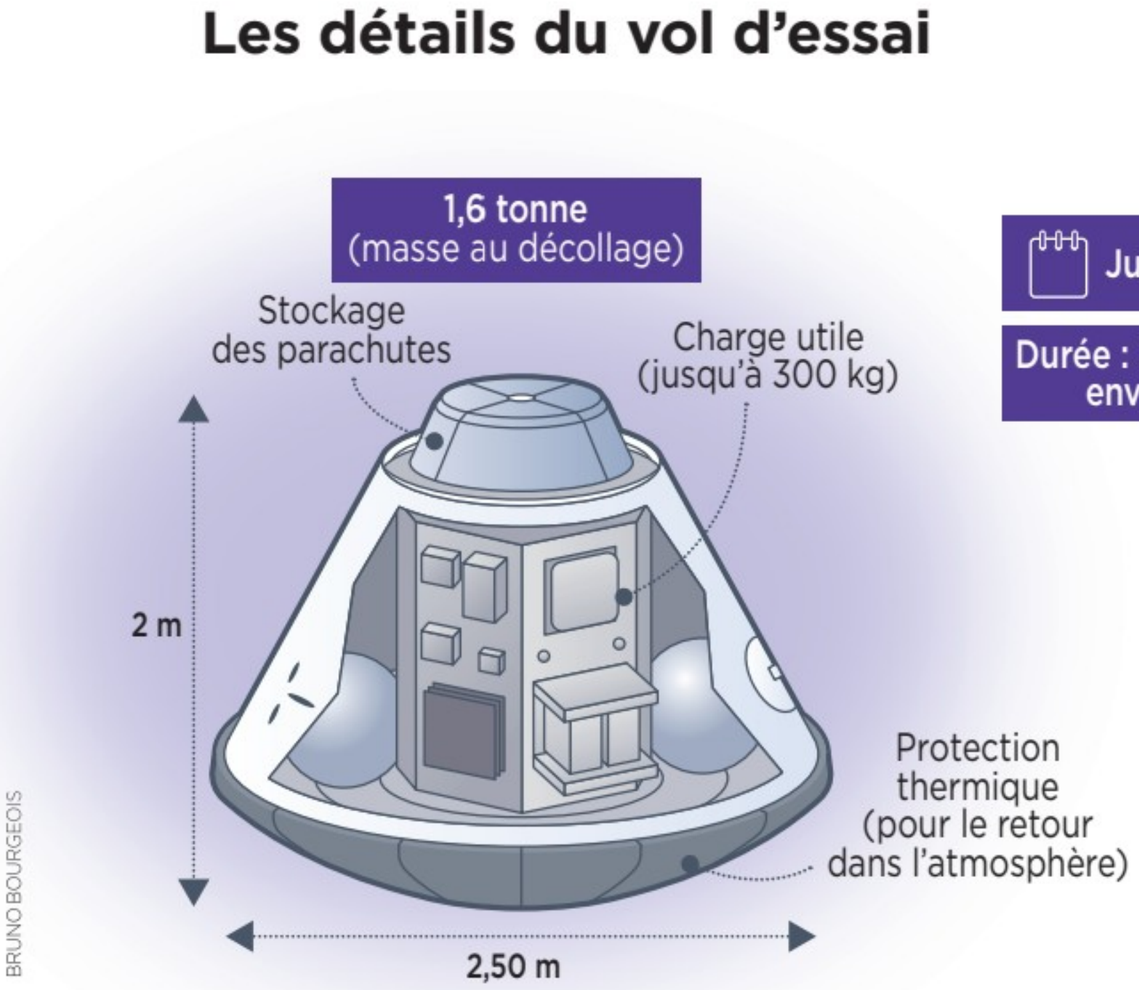
The Exploration Company a gagné le surnom de « SpaceX européen ». Elle compte bien s'inscrire dans un paysage spatial appelé à changer radicalement avec le démantèlement de l'ISS dès 2030

THE EXPLOITATION COMPAGNY

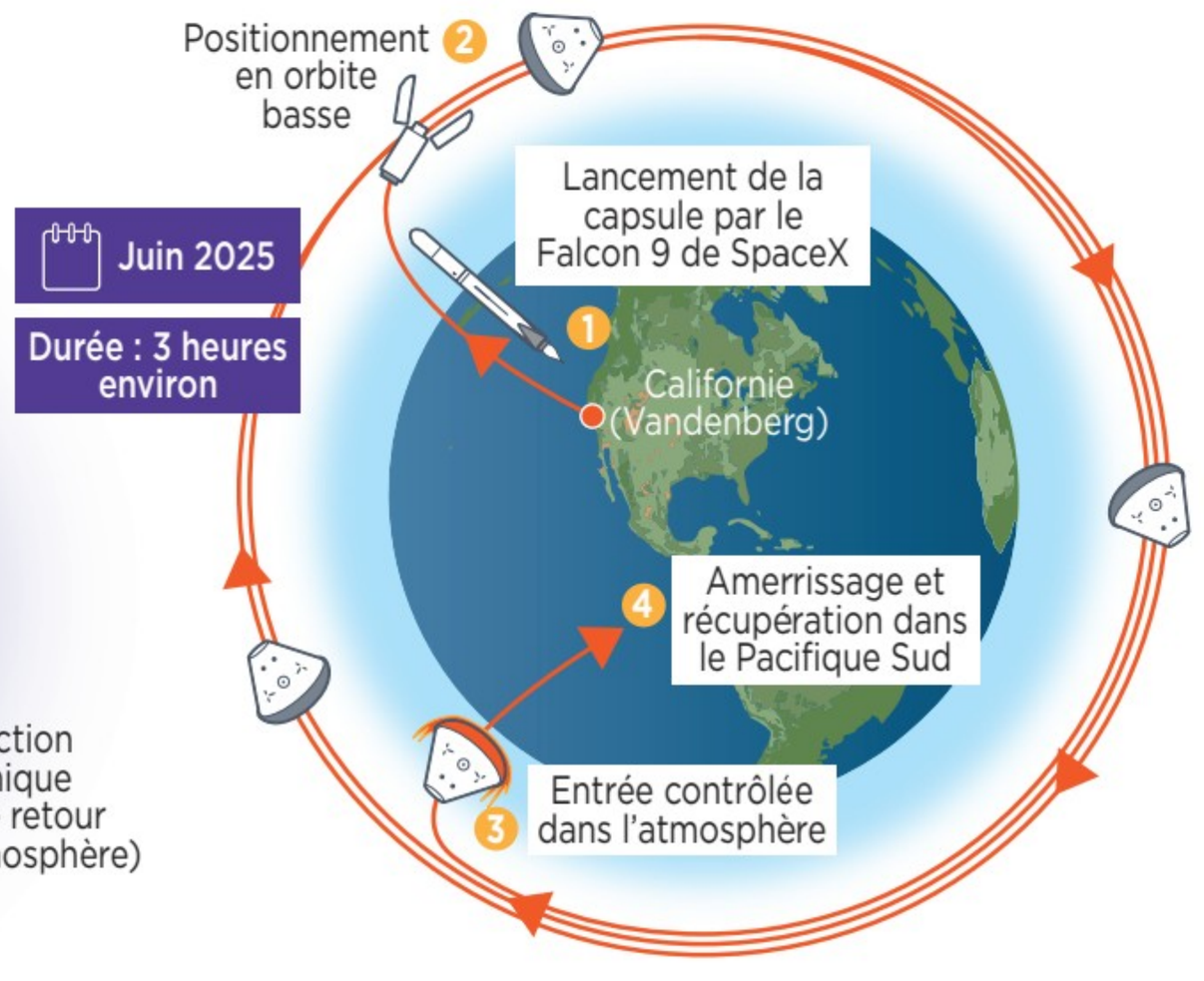
Au retour, le vent dirigera sa trajectoire dans l'atmosphère

Nyx est déjà toute parée de son enveloppe de liège ignifuge de plusieurs centimètres, utilisé dans l'ingénierie spatiale pour repousser le feu. Avec la chaleur à laquelle le haut de la capsule va être soumis, l'équipe ne s'attend à retrouver que 3,5 millimètres des 3,5 centimètres d'épaisseur de liège qui recouvrent la surface de Nyx. La capsule est pour le moment posée « à l'envers » sur l'embouchure qui lui permettra, plus tard, de s'arrimer à n'importe quel vaisseau. À certains emplacements se trouve du carrelage en céramique. « *Ce sont les endroits qui peuvent devenir particulièrement chauds, à proximité des propulseurs. Ou des zones cruciales derrière lesquelles se trouvent, par exemple, des puces électroniques* », explique Victor Maier. Impossible de mettre du carrelage en céramique partout, pour des raisons de coût mais aussi de poids, le liège étant moins cher et bien plus léger. « *Il a fallu faire des choix!* », concède-t-il.
Nyx doit parcourir entre 400 et 600 kilomètres, le temps de réaliser deux orbites et demie de notre planète. À proximité de la base de la capsule, une petite ouverture est destinée à laisser passer une caméra, chargée de se repérer dans le ciel grâce aux étoiles. Juste à côté, une trappe laissera passer le bateau gonflable sur lequel Nyx doit voguer à son retour sur Terre, le temps que l'équipe de The Exploration Company vienne la chercher quelque part dans l'océan Pacifique. Un premier petit parachute doit permettre à une boîte noire équipée d'un GPS d'être sécurisée, « *afin de récupérer toutes les données du véhicule même en cas de problème sur le retour, comme dans les avions.* » Puis le parachute classique emportera tout le reste de l'embarcation avec plus ou moins de douceur jusqu'à nous. « *Il nous faudra ensuite cinq jours en mer pour aller chercher la charge utile revenue sur Terre. Car une fois que la capsule retourne dans l'atmosphère, c'est le vent qui dirigera sa trajectoire. Nous n'avons plus la main dessus* », explique Victor Maier.

Les détails du vol d'essai



BRUNO BOURGEOIS



PHOTOPQR/LE PARISIEN/MAXPPP

L'équipe d'ingénieurs de The Exploration Company s'affaire autour du vaisseau spatial à l'intérieur de la salle stérile, dans un hangar près de Munich (Allemagne).

Si la capsule peut à terme emporter 4 tonnes de charge utile dans un volume pressurisé de 20 m³, la première mission n'embarquera que 300 kg, dont 160 kg d'expériences menées par l'Agence spatiale allemande (DLR). *« Sur Terre, les protéines cristallisent sous l'effet de la gravité, ce qui perturbe souvent leur formation, provoquant des défauts. En microgravité, l'absence de convection et de sédimentation permet aux protéines de cristalliser plus lentement et plus parfaitement. Avec un module comme Nyx, les échantillons peuvent être rapidement récupérés et rapportés sur Terre, bien plus vite que lors d'expériences dans la Station spatiale internationale (ISS) »*, explique Victor Maier. Parmi les entreprises ayant signé pour le vol de juin figurent des compagnies pharmaceutiques, une entreprise de cosmétique spécialisée dans les shampoings, une start-up qui a pour ambition de construire un rover lunaire ainsi que des producteurs de whisky curieux de faire vieillir leur alcool dans l'espace.

Prochain projet : un véhicule de fret pour l'ISS en 2028

Le décollage va se faire depuis la Californie avec les équipes de SpaceX. Avec 138 vols annuels en 2024, la compagnie spatiale d'Elon Musk est naturellement devenue le partenaire de The Exploration Company. Quinze personnes de la start-up, spécialisées dans l'électronique et la mécanique, seront également sur place pour le lancement. Ce sont elles qui s'occuperont des derniers réglages avant le lancement et de l'alimentation des batteries. *« Nyx ne sera scellée qu'une fois sur place. En cause, deux gaz, l'oxygène liquide et le biométhane, qui seront livrés en même temps et insérés dans la capsule au dernier moment afin de réduire les risques de sécurité durant le transport »*, précise Victor Maier. Pour s'envoler dans l'espace, elle sera ensuite encapsulée dans la coiffe de la fusée Falcon 9, au sommet du lanceur. Après le décollage, à environ 100 kilomètres d'altitude, la coiffe s'ouvrira : à 500 kilomètres d'altitude, Nyx sera séparée de l'étage supérieur de la fusée et placée sur son orbite basse.

Bien qu'exaltée par ce premier lancement, l'équipe de 130 personnes tente déjà de se concentrer sur le prochain projet de la start-up : un véhicule de fret spécialement conçu pour le ravitaillement de l'ISS. The Exploration Company a en effet été sélectionnée par l'Agence spatiale européenne (ESA) pour être son fournisseur officiel, celle-ci ayant abandonné son propre programme de ravitailleur ATV (pour Automated transfer vehicule). *« Thales était numéro 2 et Airbus n'a pas été sélectionné »*, détaille Victor Maier. La première mission vers l'ISS est prévue pour 2028. Cinq autres missions commerciales ont déjà été vendues, à Axiom Space, Starlab ou encore Vaast, des acteurs émergents dont l'ambition est d'établir des stations spatiales commerciales et des services orbitaux. C'est en raison de ces nombreux projets qu'en quelques années, The Exploration Company a gagné le surnom de « SpaceX européen ». Un surnom que l'entreprise ne boude pas, même si elle *« préfère d'abord prouver son sérieux avant de faire trop de bruit »*. Mais elle compte bien s'inscrire dans un paysage spatial appelé à changer radicalement dans les années à venir, avec le démantèlement de l'ISS dès 2030 : l'Inde, les États-Unis, le Japon, la Chine, la Russie, tous ont pour ambition d'avoir leur propre station spatiale. Et la start-up envisage bien de se lancer également dans les vols habités. À condition, déjà, de réussir ce premier vol ainsi que des missions lunaires à compter de 2028. ■

Coralie Lemke

TESTS

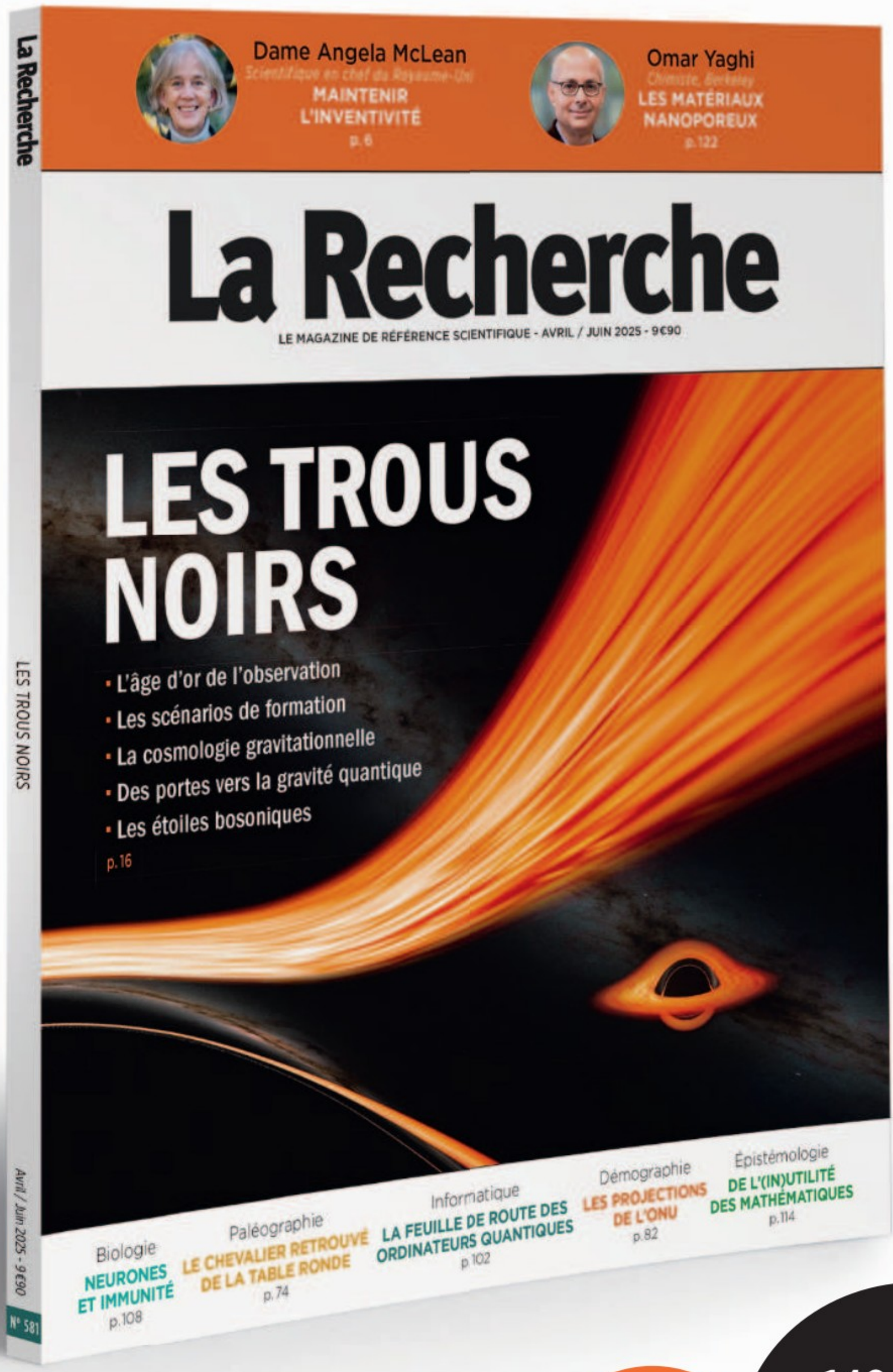
Un essai en demi-teinte pour Nyx Bikini

Le 9 juillet 2024, un premier vol test a eu lieu pour Nyx Bikini, une version réduite de la capsule mesurant 60 centimètres de diamètre pour un poids d'environ 40 kg. Dépourvue de charge utile, la capsule était destinée à se détacher de l'étage supérieur d'une fusée Ariane 6 à une vitesse d'environ 28 800 km/h, pour qu'elle effectue une rentrée atmosphérique contrôlée et amerrisse dans l'océan. Mais une anomalie au démarrage des moteurs de l'étage supérieur a empêché la libération de Nyx Bikini. Depuis, la capsule est toujours attachée à l'étage supérieur et n'est pas rentrée dans l'atmosphère comme prévu. Si la capsule envoyée en juin et mesurant cette fois 2,5 mètres de diamètre réussit sa mission, ce sera en 2026 au tour de Nyx Earth, au diamètre définitif de 4 mètres, d'être lancée.

35 SCIENTIFIQUES PARTICIPENT À CE NUMÉRO

La Recherche

LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE



Chez votre marchand de journaux

148 pages
MAGAZINE-LIVRE
Trimestriel

ANTOINE MOREAU DUSAULT POUR SCIENCES ET AVENIR

L'IA en appui de la cybersécurité

Les modèles de langage permettent de doper les techniques de sécurité automatisées chargées de repérer des failles dans les logiciels. Un gain de temps précieux pour les entreprises dans leur lutte contre les cybermenaces.

Lors de son dernier bilan annuel des cybermenaces, fin janvier, le Clusif, association française de professionnels de la cybersécurité, accordait une place notable aux dangers que fait peser l'intelligence artificielle (IA). Cela va du code malveillant écrit par un modèle de langage (LLM) à l'injection d'instructions cachées dans un mail, invisibles par l'utilisateur mais lisibles par un outil d'IA conçu pour traiter les messages électroniques et qui, de fait, va libérer un virus.

Néanmoins, l'IA se révèle aussi être une *« précieuse alliée au quotidien »* pour les experts en cybersécurité, selon Gérôme Billois, spécialiste du sujet au cabinet Wavestone et intervenant au Clusif. Mi-septembre 2024, une équipe de Google a ainsi découvert 26 failles logicielles, dont une dans les outils de chiffrement des communications OpenSSL, à l'aide de modèles de langage. Ces derniers ont opéré en poussant plus loin que ne le font les testeurs humains le « fuzzing », c'est-à-dire la multiplication des

26
vulnérabilités découvertes en septembre 2024 par Google Deepmind dans des codes open source en utilisant des LLM.

scénarios d'attaque contre un programme *(lire l'encadré)*. Le mois suivant, une autre équipe de Google a identifié une vulnérabilité dans le moteur de base de données SQLite en utilisant le LLM Big Sleep, développé à cet effet. Plus de 150 heures de fuzzing traditionnel n'avaient révélé aucun bug.

L'IA propose une règle de détection à l'analyste

Thales s'est également tourné vers les modèles de langage pour doper la réactivité de ses SOC (security operations centers), ces plateformes chargées, au sein des entreprises, de détecter et d'analyser les cybermenaces en continu, et d'y réagir. Classiquement, un SOC reçoit des rapports sur une attaque en cours, sur la modification de tel programme malveillant, sur la découverte d'une vulnérabilité dans un logiciel, etc. Les SOC doivent trier tout cela, retenir ce qui est pertinent pour eux et définir de nouvelles règles de sécurité en conséquence. Ce qui implique un gros travail de documentation, de contextualisation, de comparaison avec des règles existantes. Ce processus prend entre un et cinq jours en fonction de la complexité de la menace. *« C'est un temps durant lequel on est au courant de la menace mais sans être capable d'y répondre, de proposer une défense au client »*, note Pierre-Élisée Flory, ingénieur de recherche chez Thales, au sein de l'équipe cortAIx. D'où le développement d'un agent conversationnel capable, quand un bulletin de sécurité arrive, de dégrossir le travail à partir d'un prompt automatique déjà prêt. *« L'IA va faire des requêtes à des sources internes et externes, voir si dans la base de règles existantes certaines peuvent s'appliquer à la nouvelle menace, faire le travail de contextualisation, pour proposer une règle de détection que l'analyste peut modifier »*, poursuit l'ingénieur. Cette fois, quelques minutes voire secondes suffisent. L'IA fournit les sources, l'explication de la stratégie adoptée, des exemples de règles utilisées pour rédiger la nouvelle, etc., de manière à permettre à l'analyste de comprendre tout le cheminement logique. *« L'IA n'est que force de proposition, pas décideuse,* insiste Christophe Meyer, directeur technique de cortAIx. *La procédure de validation finale qui dit "oui, cette règle-là me convient" reste le fait d'un expert humain. »*

« Avec les LLM, il devient possible de traiter et comprendre une mine de connaissances écrites par des experts pour des experts, confirme Pierre-François Gimenez, de l'équipe Pirat dédiée à la cybersécurité au centre Inria (Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique) de Rennes. *Mais c'est juste une application possible parmi beaucoup d'autres. »*

Au sein de Pirat, le chercheur travaille sur la détection d'intrusions, ce qui nécessite d'avoir beaucoup de données réseaux. Or, celles à disposition ne sont pas de bonne qualité, et il n'est pas question d'aller placer des sondes sur les réseaux pour en collecter. Le projet consiste donc à générer des données par IA, comme des traces réseaux ou des logs systèmes (historiques d'événements), et s'en servir pour l'évaluation d'outils de détection. *« Ces méthodes d'IA n'ont pas encore vraiment quitté les laboratoires de recherche,* prévient le chercheur. *La cybersécurité prend clairement cette direction mais il est encore difficile d'utiliser ces outils dans un cadre opérationnel. »* ■

Arnaud Devillard

LE MOT DU MOIS

Fuzzing

En cybersécurité, le fuzzing est une méthode de test par laquelle on envoie à un logiciel toutes sortes de données mal adaptées, tronquées, inattendues et plus ou moins aléatoires, de manière à rendre difficile leur traitement. Le but est de pousser le logiciel dans ses limites et révéler d'éventuelles failles. Cette pratique prend beaucoup de temps. Le fuzzing assisté par IA permet non seulement de multiplier les attaques, mais aussi de faire apprendre à un algorithme lesquelles fonctionnent. Sur cette base, il va pouvoir lancer toutes les variantes possibles d'une attaque réussie. C'est un bon moyen de savoir comment corriger un programme. L'inconvénient est que des cybercriminels peuvent eux-mêmes procéder ainsi, avec des intentions nuisibles.

POUR EN SAVOIR PLUS

Analyse collaborative pilotée par l'Agence nationale de la sécurité des systèmes d'Information des risques cyber posés par l'IA :
sciav.fr/940cyber

P-F GIMENEZ

> “ La cybersécurité prend clairement la direction de l'IA mais il est encore difficile d'utiliser ces outils dans un cadre opérationnel ”
>
> **Pierre-François Gimenez,** chercheur à Inria Rennes

L'usine Daikin Chemical France, à Oullins-Pierre-Bénite, est l'un des cinq sites de production de « polluants éternels » en France. Au premier plan, cet ex-employé de l'entreprise souffre de problèmes endocriniens non reconnus à ce jour par la médecine du travail.

PFAS

La vallée de la chimie empoisonnée

Au sud de Lyon, le site industriel d'Oullins-Pierre-Bénite est l'un des plus pollués de France. En cause : des molécules chimiques perfluorées de synthèse, toxiques pour l'humain et persistantes dans l'environnement. En l'absence de réglementation nationale, les riverains ont sollicité l'aide d'un chercheur canadien. Ses analyses sont alarmantes et mettent en évidence un transfert de la pollution des sols vers la chaîne alimentaire.

Par Estelle Levresse - Photos : Bastien Doudaine / Hans Lucas / Collectif Relief

Ce 18 décembre 2024, la conférence sur la pollution aux PFAS (substances perfluoroalkylées et polyfluoroalkylées), organisée à Mions dans l'agglomération lyonnaise, fait salle comble. Le professeur canadien en chimie environnementale Sébastien Sauvé et le collectif citoyen local Ozon l'eau saine présentent les études de science participative qu'ils ont menées dans la vallée de la chimie, le territoire industriel au sud de Lyon, sur les polluants éternels, des molécules chimiques perfluorées de synthèse, toxiques pour l'humain et persistantes dans l'environnement.

Sites de production de PFAS en France.

BRUNO BOURGEOIS

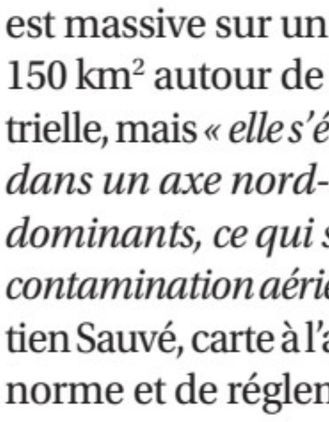
Les analyses ont porté sur 200 prélèvements de terre réalisés dans des écoles, parcs publics, jardins privés et parcelles agricoles par des citoyens volontaires, suivant un protocole précis établi par le chercheur. Ceux-ci ont ensuite été envoyés au Canada pour être étudiés dans son laboratoire de l'université de Montréal. Les échantillons couvraient une soixantaine de communes autour d'Oullins-Pierre-Bénite, qui accueille deux usines productrices de PFAS suspectées d'être à l'origine de la pollution : l'une appartient au géant français de la chimie Arkema, l'autre à Daikin Chemical France, filiale chimique du groupe japonais Daikin spécialisé dans la climatisation.

Jouxtant l'usine Arkema à Oullins-Pierre-Bénite, les terrains de sport sont toujours fréquentés par les adultes et les enfants, malgré la contamination massive des sols autour des bâtiments industriels, confirmée par plusieurs études.

Les résultats confirment les inquiétudes : non seulement la contamination des sols est massive sur un périmètre d'environ 150 km² autour de la plateforme industrielle, mais *« elle s'étend jusqu'à 20-30 km dans un axe nord-sud qui suit les vents dominants, ce qui suggère une source de contamination aérienne »*, indique Sébastien Sauvé, carte à l'appui. En l'absence de norme et de réglementation applicable sur la présence de PFAS dans les sols en France, le chercheur donne des ordres de grandeur. *« On estime qu'un sol propre contient entre 0,5 et 2 microgrammes de PFAS par kilo. À partir de 10 µg/kg, la situation devient préoccupante. »* Sur la large zone analysée dans l'étude, il n'y a quasiment aucun sol propre et près de 40 % des résultats présentent une concentration supérieure à 10 µg/kg pour 80 PFAS analysés. À proximité de la plateforme industrielle, certains prélèvements dépassent les 50, voire les 100 µg/kg. Par exemple, à l'école maternelle Henri-Wallon d'Oullins-Pierre-Bénite, la contamination s'élève à 114 µg/kg ; au stade du Brotillon, 156 µg/kg.

« Il faut poursuivre la caractérisation de l'environnement en région lyonnaise et des différentes voies de contamination aux PFAS pour permettre une meilleure évaluation du risque », commente Pierre Labadie, directeur de recherche CNRS au laboratoire Environnements et paléoenvironnements océaniques et continentaux (Epoc) de Bordeaux. D'autant plus que l'étude met en évidence un transfert de la pollution des sols vers la chaîne alimentaire, notamment vers les œufs. Dans le détail, elle révèle une concentration significative de molécules issues du surflon, un composé chimique utilisé entre 2003 et 2016 par Atofina — devenue Arkema en 2004 — pour la production du PVDF, un plastique de haute performance, l'un des produits phares du groupe commercialisé sous le nom de Kynar. Or, le surflon contient des perfluorés à chaînes très longues (PFNA et PFUnDA), reconnus pour leur forte toxicité sur l'humain et l'environnement.

« Un rapport de l'Anses [Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation] *de 2022 avait déjà mis en avant cette signature chimique, qualifiant les niveaux de concentration en perfluorés à chaînes longues relevés à Pierre-Bénite comme des "records mondiaux" autour de l'enceinte d'une usine,* alerte Pauline Cervan, toxicologue au sein de l'ONG Générations



GÉNÉRATIONS FUTURES

« Avec l'étude de l'Anses de 2022, nous avons la preuve qu'Arkema a vraiment contaminé une large étendue du territoire »

Pauline Cervan, toxicologue au sein de l'ONG Générations futures

futures. *Avec cette étude, nous avons la preuve qu'Arkema a vraiment contaminé une large étendue du territoire.* » La préfecture du Rhône recommande de ne pas consommer les fruits et les légumes des potagers des particuliers dans un périmètre de 500 m autour de la plateforme industrielle, ni les œufs et la chair de volaille des poulaillers privés dans les arrondissements du sud de Lyon et une quinzaine de communes environnantes.

Deux substances interdites en Europe présentes dans l'eau

C'est la seconde fois que Sébastien Sauvé vient présenter les résultats de ses recherches dans la vallée de la chimie. Il a été contacté en 2023 par Louis Delon, maraîcher en agriculture biologique, installé dans le sud de Lyon. Avec d'autres parents inquiets pour la santé de leurs enfants, ce chimiste de formation, dont la thèse de doctorat portait précisément sur les molécules perfluorées, a fondé en 2022 le collectif Ozon l'eau saine. Sébastien Sauvé, spécialisé en agronomie, sciences des sols et polluants émergents, a quant à lui commencé à travailler sur les PFAS au début des années 2010. *« À l'époque, cela n'intéressait pas beaucoup de monde »*, se rappelle-t-il. Mais le scandale du Téflon secoue les États-Unis depuis plusieurs années. Le groupe chimique DuPont sera reconnu coupable d'avoir contaminé plus de 70 000 personnes en Virginie occidentale avec le PFOA (acide perfluorooctanoïque), un PFAS entrant dans la composition du revêtement anti-adhésif.

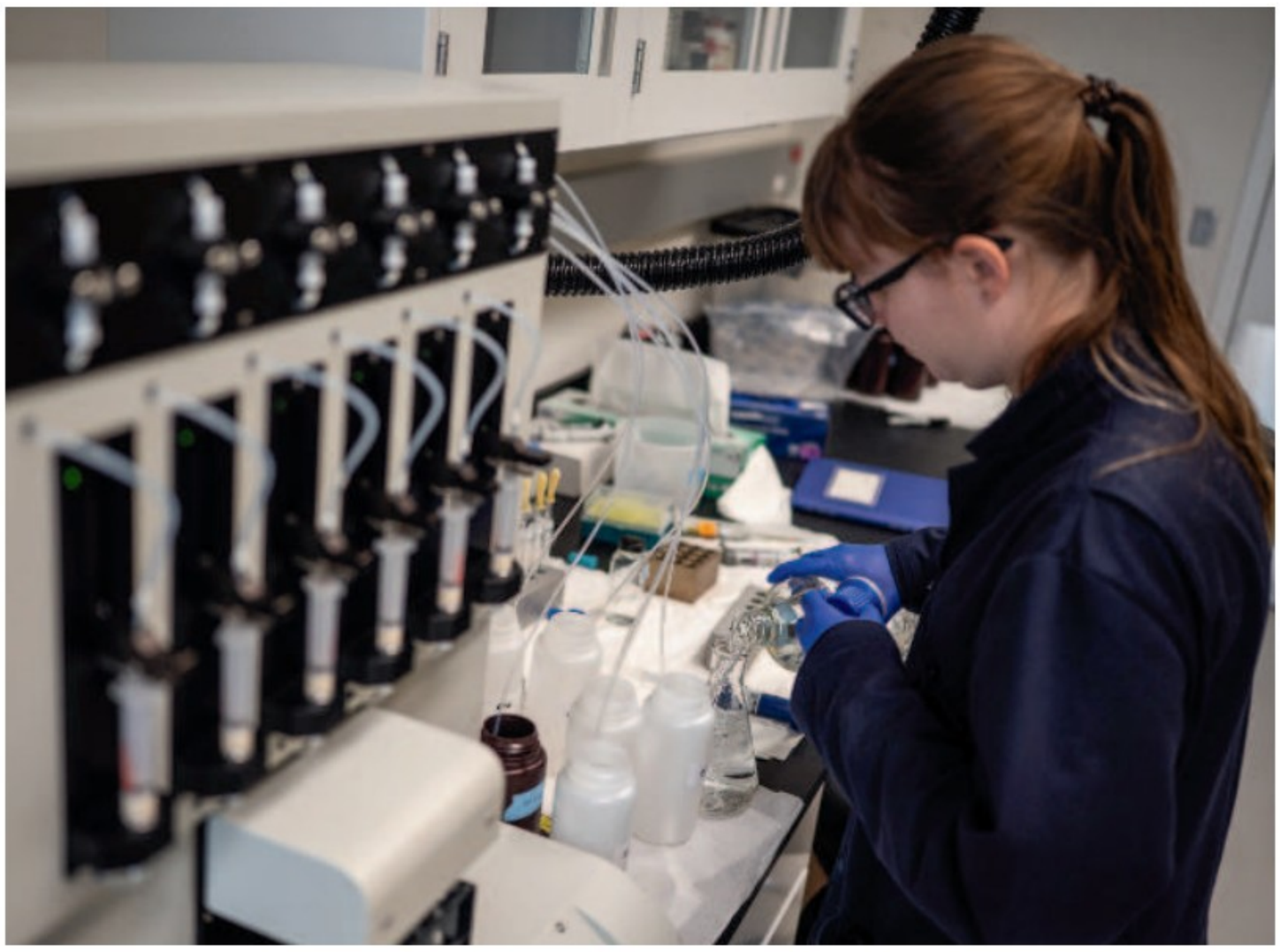
Après plusieurs échanges avec Louis Delon, Sébastien Sauvé accepte d'analyser des premiers échantillons d'eau. Quelques mois plus tard, les résultats dévoilent *« un niveau de contamination exceptionnel »*. La collaboration commence, basée sur une science participative. *« Il y a une grande valeur ajoutée à travailler avec des citoyens. Seul, il m'aurait été impossible de réaliser des études d'une telle envergure »*, souligne le chercheur. À Mions, il présente la campagne d'analyses d'eau réa-

Prélèvement de terre effectué par Louis Delon, ancien chimiste converti dans le maraîchage biologique à Chasse-sur-Rhône, porte-parole du collectif Ozon l'eau saine.

INDUSTRIE

Une famille de plus de 10 000 composés chimiques perfluorés

Les PFAS (acronyme de per- et polyfluoroalkyl substances en anglais ; substances per- et polyfluoroalkylées) désignent une famille de plus de 10 000 composés chimiques perfluorés de synthèse. Selon la définition de l'OCDE, toute substance (polymère ou non polymère) comportant au moins un atome de carbone entièrement fluoré (sans atome H/Cl/Br/I attaché) de type méthyle (-CF3) ou méthylène (-CF2-) est un PFAS. Cette liaison carbone-fluor extrêmement stable confère aux PFAS une résistance à la chaleur et des propriétés antiadhésives et imperméabilisantes remarquables. Depuis les années 1950, ceux-ci sont utilisés massivement dans tous les domaines de l'industrie et entrent dans la composition de nombreux objets du quotidien (textiles, emballages alimentaires, cosmétiques, ustensiles de cuisine, mousses anti-incendie…). Revers de la médaille : les PFAS ne se dégradent pas dans l'environnement. On distingue les PFAS à chaîne longue et les PFAS à chaîne courte, selon la taille de la liaison carbone-fluor. Si ces derniers sont moins bioaccumulables dans le corps humain, ils sont en revanche plus mobiles, contaminant tous les écosystèmes. Surnommés les « polluants éternels », les PFAS sont considérés par le collectif d'experts indépendants Global PFAS Science Panel comme *« le problème de pollution le plus grave »* auquel doit faire face l'humanité.



Envoyés au Canada, les échantillons de terre et d'eau prélevés par les citoyens rhodaniens sont analysés par l'équipe de Sébastien Sauvé au laboratoire de l'université de Montréal.

lisée courant 2023 dans le sud et dans l'ouest de Lyon, dont les résultats ont été publiés dans la revue scientifique *Environmental Science & Technology Letters* en février dernier. L'étude portait sur la concentration de 77 PFAS dans des étangs, des rivières, des puits, de l'eau du robinet… *« On observe une forte contamination des nappes phréatiques et 67 % des échantillons d'eau du robinet dépassent la recommandation européenne de 100 nanogrammes/l pour la somme de 20 PFAS »*, indique Sébastien Sauvé. Les données corroborent les études de l'agence régionale de santé estimant que plus de 160 000 personnes en Auvergne-Rhône-Alpes sont alimentées par une eau potable non conforme. Plus précisément, les analyses révèlent la présence dans l'eau de PFOS (acide perfluorooctanesulfonique) et PFOA (acide perfluorooctanoïque), deux substances interdites en Europe respectivement depuis 2009 et 2020. Faute de réglementation française spécifique à ces deux composés, le chercheur canadien a pris pour référence la limite fixée aux États-Unis, où le seuil individuel par PFAS est de 4 ng/l. Conclusion : toutes les analyses d'eau du robinet dépassent cette norme américaine. *« Même si cela n'a aucune valeur réglementaire en France, c'est intéressant car cela permet de contextualiser les résultats et de les confronter à des cadres réglementaires plus stricts,* estime le chercheur Pierre Labadie, qui avait lui-même travaillé sur la pollution du Rhône dans les années 2010 avec des collègues de l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae) et de l'École nationale des travaux publics de l'État (ENTPE). *Grâce à une carotte de sédiments prélevés à une trentaine de kilomètres en aval de Lyon, nous avions reconstruit l'historique de contamination des sédiments du Rhône. On observait très bien des niveaux maximums dans les années 1990, une réduction dans les années 2000 puis une stabilisation, avec des changements de profils de contamination assez brutaux dans les sédiments que l'on avait attribués à des changements de procédés industriels sur la plateforme de Pierre-Bénite. Mais on n'avait pas les données à l'époque pour venir étayer ces hypothèses.* »

Après des décennies de pollution, le site autour des usines — qui ont connu différents noms et propriétaires — est l'un des plus contaminés de France. Les industriels polluent-ils encore aujourd'hui ? Interrogées par *Sciences et Avenir,* les deux entreprises font valoir qu'elles ont toujours respecté les normes en vigueur. Arkema assure que conformément à ses engagements, l'usine de Pierre-Bénite a *« cessé, depuis fin décembre 2024, toute utilisation de 6:2 FTS, seul surfactant PFAS qui entrait encore dans son proces-*

« Il y a une grande valeur ajoutée à travailler avec des citoyens. Seul, il m'aurait été impossible de réaliser des études d'une telle envergure »

Sébastien Sauvé, professeur en chimie environnementale à l'université de Montréal (Canada)

TOXICOLOGIE

Les effets des polluants éternels sur la santé

L'exposition aux PFAS entraînerait, parmi une longue liste d'effets suspectés, une diminution des défenses immunitaires, des troubles métaboliques ou thyroïdiens et des cancers.

La contamination humaine se fait principalement par voie orale *via* l'alimentation et l'eau potable. Les protéines animales (poissons, viandes, produits laitiers, œufs) sont les aliments contribuant le plus à l'exposition aux PFAS. En outre, ils traversent la barrière placentaire et se retrouvent dans le lait maternel, exposant ainsi les nourrissons. Une fois ingérés, les PFAS, en particulier ceux dotés de longues chaînes carbone-fluor, s'accumulent dans l'organisme, le foie n'ayant pas les enzymes nécessaires pour les dégrader. Selon le rapport publié en 2022 par les Académies nationales américaines des sciences, de l'ingénierie et de médecine qui ont réalisé un examen approfondi des études scientifiques, l'exposition aux PFAS entraîne une diminution de la réponse immunitaire, réduisant l'efficacité des vaccins et augmentant la vulnérabilité aux infections, aussi bien chez les adultes que chez les enfants. Ces substances sont également impliquées dans des troubles métaboliques, notamment la dyslipidémie (déséquilibre des lipides sanguins) et ralentissent la croissance du fœtus et du nourrisson. Elles augmentent également le risque de cancer du rein. D'autres effets sur la santé sont suspectés : augmentation du risque de cancer du sein et des testicules chez les adultes, anomalies hépatiques, troubles thyroïdiens, risque plus élevé de développer une rectocolite hémorragique et, chez les femmes enceintes, d'hypertension pouvant mener à une prééclampsie. Si le PFOA et le PFOS ont été classés respectivement comme cancérogène avéré et cancérogène possible par le Centre international de recherche sur le cancer (Circ), l'organisme suggère, compte tenu du très grand nombre de PFAS, de les regrouper en fonction de leur structure chimique ou de leurs niveaux d'exposition. Le Circ note également que la plupart des études portent sur certains PFAS en particulier, alors que l'exposition humaine est multiple, ce qui constitue une limite importante dans l'évaluation des risques pour la santé humaine. En 2019, l'étude Esteban coordonnée par Santé publique France a révélé une imprégnation plus ou moins importante de la totalité de la population française. Sept PFAS ont été quantifiés à plus de 40 % chez les adultes et six chez les enfants. Le PFOA et le PFOS ont été retrouvés chez 100 % des personnes testées. Une nouvelle étude baptisée Albane est en cours pour déterminer l'évolution de cette contamination. Et le professeur Vincent Bonneterre, du Centre régional de pathologie professionnelle et environnementale Aura, au CHU de Grenoble Alpes, mène actuellement un projet de recherche visant à tracer les niveaux d'exposition des travailleurs les plus exposés aux PFAS en Auvergne-Rhône-Alpes. ■

Riverains et associations rhodaniens se mobilisent contre l'extension de la pollution aux PFAS, en septembre 2024 lors de la réouverture d'une nouvelle unité dans l'usine Daikin.

sus industriel ». Le site continue toutefois de produire du Kynar (PVDF ou polyfluorure de vinylidène), un PFAS entrant dans la catégorie des polymères fluorés qui, selon le géant de la chimie, *« ne se dégradent pas dans l'environnement »* et *« ne présentent pas de risques pour la santé humaine »*. Des affirmations remises en cause par le collectif d'experts indépendants Global PFAS Science Panel, qui estime que le cycle de vie entier des fluoropolymères doit être pris en compte, notamment la production et la fin de vie car elles génèrent des émissions et des déchets saturés en PFAS.

Un système de filtration des PFAS a été installé chez Daikin, à Pierre-Bénite, afin de réduire les émissions de particules.

Si Arkema s'est contentée d'une réponse par mail, Daikin Chemical France s'est, elle, montrée plus communicante, se disant consciente des inquiétudes des riverains. *« Nous avons décidé d'ouvrir davantage nos portes,* déclare Gaël Marseille, le directeur de l'usine d'Oullins-Pierre Bénite, lors d'une visite des installations en décembre 2024. *L'objectif est de mieux expliquer nos processus industriels et les efforts que nous mettons en œuvre pour minimiser l'impact environnemental.* » En activité depuis 2004, l'usine, qui compte environ 70 salariés, fonctionne en continu pour produire un élastomère fluoré, sous forme de plaques empilées en paquets de 20 kg, principalement destiné à l'industrie automobile. Le processus de fabrication repose sur l'utilisation de deux gaz fluorés : le VF2 fourni par Arkema *via* une canalisation entre les deux usines, et l'HFP, livré par conteneurs, qui entre dans la catégorie des PFAS. Il inclut également l'utilisation du PFHXA (acide perfluorohexanoïque) comme agent surfactant qui devrait être remplacé par une substance non fluorée à compter du 1er janvier 2026. En matière de gestion des eaux usées, la station de traitement du site a été modernisée en 2017. *« Nous avons volontairement investi dans une technologie avancée pour aller au-delà des exigences réglementaires »*, souligne Gaël Marseille qui déclare capter désormais 99,98 % du PFHXA trouvé à l'entrée de la station, *« ce qui correspond à environ 1 kg de déchets par an »*.

Un nouveau PFAS introduit en 2024

En février 2024, le site a ouvert une nouvelle unité de production dite de « précompound », qui consiste à incorporer un agent de vulcanisation, le bisphénol AF, au polymère de base. Autrefois réalisée aux Pays-Bas, cette activité impliquant l'utilisation d'un nouveau PFAS sur le site de Pierre-Bénite a provoqué la colère des associations locales de riverains qui ont engagé une action en justice pour demander son interdiction. Suspendue pendant quatre mois, l'activité a été réautorisée après que l'usine a renforcé ses dispositifs de filtration, installant notamment des filtres absolus. *« Nous sommes fiers d'être parmi les premiers industriels à avoir installé ce dispositif dans le secteur de la chimie : nos émissions de particules sont passées de 23 kg par an à seulement 1 à 2 grammes »*, se félicite Gaël Marseille.

Une loi prévoyant l'interdiction, dès 2026, de la fabrication et de la vente des polluants éternels pour les textiles d'habillement, les produits de fartage, les cosmétiques, les chaussures et leurs imperméabilisants a été adoptée le 20 février. Elle inclut également l'établissement d'une redevance payée par les industriels dont l'activité entraîne le rejet de PFAS dans l'eau. Une avancée majeure dans l'application du principe pollueur-payeur, qui ne contribuera pas, toutefois, à la décontamination des sites historiquement pollués comme celui de Pierre-Bénite. ■

ENVIRONNEMENT

Comment dépolluer ?

De nombreuses solutions de décontamination sont à l'étude ou déjà testées un peu partout dans le monde selon deux approches : la capture des PFAS grâce à des résines, des charbons actifs ou par des plantes absorbantes, et leur destruction par incinération à plus de 950 °C ou par électrochimie — qui ne permet qu'une dégradation partielle. Des méthodes non seulement très coûteuses, mais aussi pour certaines peu respectueuses de l'environnement, notamment en raison des résidus toxiques qu'elles génèrent. À Lyon, le laboratoire Microbiologie des environnements extrêmes de l'Institut national des sciences appliquées (Insa) explore une solution intéressante : la bioremédiation. Elle consiste à utiliser des micro-organismes capables de s'adapter et potentiellement de dégrader les PFAS. Pour explorer cette voie, le laboratoire analyse des bactéries issues des sols contaminés pour identifier celles qui possèdent des capacités de dégradation.

BENOÎT LAGNEUX / LE DAUPHINÉ LIBÉRÉ/PHOTO PQR MAXPPP

Située dans le massif de l'Oisans, La Bérarde (Isère) a été dévastée par une lave torrentielle il y a un an.

Quand la montagne dévale sur un village

Le hameau de La Bérarde s'est retrouvé sous des tonnes de rochers et de cailloux en juin 2024. Comment expliquer un phénomène d'une telle ampleur à cette période ? Des chercheurs ont reconstitué ce scénario digne d'un film catastrophe.

Le 21 juin 2024, la montagne est tombée sur La Bérarde (Isère), heureusement sans faire de victimes. En quelques heures, le hameau du massif de l'Oisans, d'une cinquantaine d'habitants, s'est retrouvé enfoui sous plus de 250 000 m^3 de gros blocs de pierre, de milliards de cailloux, de graviers. De certains chalets on ne voit plus que le toit. Une « lave torrentielle » est passée par là et La Bérarde soudain est devenue un témoin essentiel pour comprendre ce qu'est ce phénomène aussi brutal que bref. Les chercheurs ont sous les yeux un laboratoire à ciel ouvert qui leur montre comment les Alpes en général, le massif des Écrins en particulier, s'érodent et se délitent sous l'accélérateur du changement climatique.

BRUNO BOURGEOIS

« Une lave torrentielle, c'est un mélange d'eau et de matériaux arrachés à la montagne qui est cohérent malgré l'hétérogénéité des éléments qui la composent », expose Clément Misset, ingénieur en

hydraulique torrentielle à l'unité Restauration des terrains de montagne (RTM) de l'Office national des forêts. Ces événements sont fréquents. RTM en a dénombré 47 840 dans les Alpes et les Pyrénées depuis l'ouverture de sa base de données en 1980. Ils ont affecté 23 677 sites des deux grandes montagnes françaises. Et il y en a de plus en plus. « *Entre 2003 et 2013, on comptait 170 événements par an dans les Alpes,* signale Clément Misset. *Entre 2013 et 2023, on est passé à 245 par an.* » Une augmentation à pondérer car ne sont répertoriés ici que les phénomènes constatés par des témoins.

CLÉMENT MISSET

« Avec le changement climatique, les glaciers fondent plus vite et ce sont des centaines de lacs supraglaciaires qui se forment »

Clément Misset, ingénieur en hydraulique torrentielle à l'unité Restauration des terrains de montagne à l'Office national des forêts

La météo, déclencheur de la catastrophe

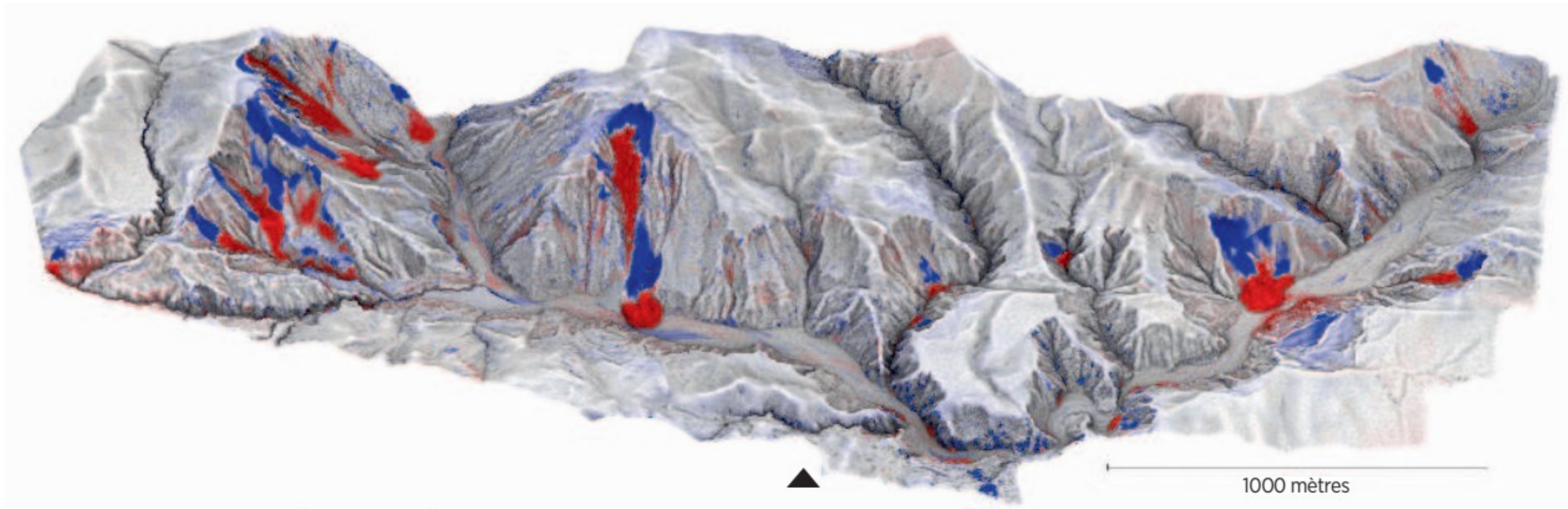
« *Un massif montagneux, ce sont des milliers de petits torrents et ruisseaux qui gonflent à la fonte des neiges ou lors de précipitations et ont donc des variations de débit très importantes* », rappelle Clément Misset. La Bérarde a été bâtie au XIVe siècle sur un cône de déjection à la confluence de deux de ces cours d'eau, le Vénéon, nourri par le glacier de la Pilatte et le torrent des Étençons, lui-même nourri par le torrent de Bonne Pierre, issu du glacier du même nom. Le bassin-versant du Vénéon couvre 24 km², celui de Bonne Pierre 8 km². Des zones très pentues mais de faible surface qui se sont purgées en moins de quatre heures. Durant six mois, les chercheurs de Météo France, de RTM, de l'université de Grenoble et d'EDF ont reconstitué l'enchaînement des circonstances amenant à la catastrophe.

Le déclencheur, c'est la météo. Dans les Alpes, le mois de juin 2024 a été particulièrement pluvieux. Près de 100 millimètres de pluies du 1er au 17 juin ont rendu les sols spongieux. Puis, à partir du 17 juin, les flux d'ouest ont fait place à une masse d'air humide et chaude en provenance des latitudes tropicales, apportant du sable du Sahara. Les températures remontent alors et le manteau neigeux fond rapidement. Du 19 au 20 juin, de fortes pluies accompagnent le redoux. La limite pluie/neige se situe aux alentours de 3500 mètres ! Puis, dans la journée du 20 juin, le redoux fait place à un nouveau refroidissement qui provoque de nouvelles pluies. Du 19 juin à 8 heures au 21 juin à 8 heures, il est ainsi tombé sur ce coin d'Oisans 100,6 mm d'eau.

+44%
L'augmentation du nombre d'événements annuels de laves torrentielles dans les Alpes entre les décennies 2003-2013 et 2013-2023.
(SOURCE: RTM.)

Un tel déluge aurait en temps normal provoqué une crue rapide et sévère du Vénéon et des Étançons. La Bérarde y est habituée. De telles valeurs sont enregistrées au moins une fois tous les dix ans. Mais habituellement, la pluie tombe en fin d'été, quand il n'y a plus de neige en altitude. Or, en ce début d'été, il en restait beaucoup et elle a fondu du fait de l'effet de fœhn. Pour juin, le record remonte à 1958. La crue est cette fois bien plus importante, mais elle n'aurait pas provoqué une telle érosion sans un troisième phénomène. « *L'essentiel de la lave est arrivé par le petit torrent de Bonne Pierre,* poursuit Clément Misset. *Nos visites sur le terrain ont révélé que le glacier qui l'alimente s'était purgé d'un lac supraglaciaire.* » Un tel phénomène est provoqué

DIMITRI LAGUE, (CNRS/UNIVERSITÉ DE RENNES 2)



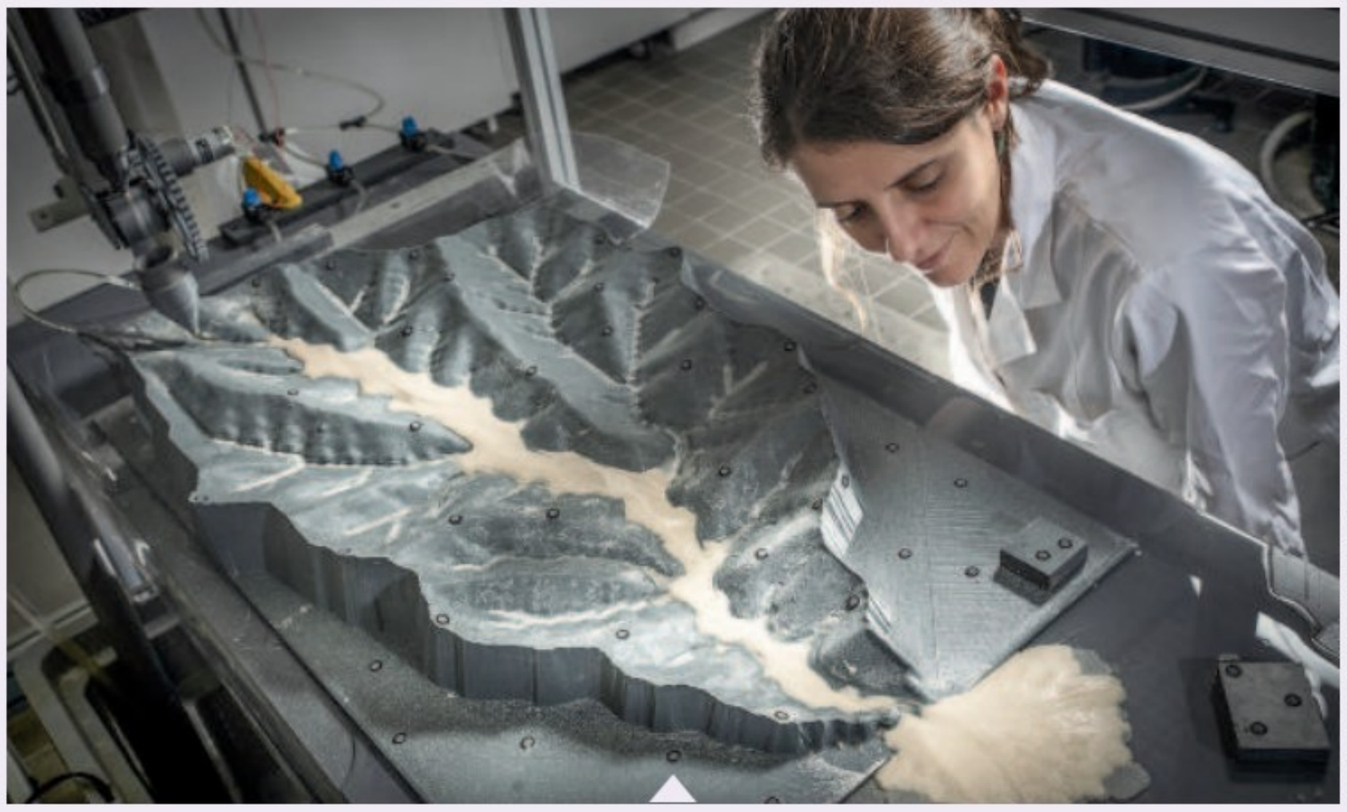
Grâce au système lidar, les relevés aériens permettent désormais de connaître les modifications du relief avant et après un événement intense (ici des glissements de terrain, en rouge et bleu, déclenchés en 2016 par le séisme de Kaikoura, en Nouvelle-Zélande).

par des températures élevées en altitude. La surface des glaciers fond pour former des cuvettes d'eau retenues par les couches inférieures de glace. Dans la nuit du 21 juin, la cuvette s'est percée, libérant 100 000 m³ d'eau qui ont trouvé leur chemin entre les moraines et la glace et se sont précipités dans l'étroit sillon du torrent, rabotant blocs de roches et graviers. Remis en décembre 2024, le rapport révèle ainsi un scénario qui peut se répéter partout dans tous les massifs montagneux. *« Avec le changement climatique, les glaciers fondent plus vite et ce sont désormais des centaines de lacs supraglaciaires qui se forment en juin pour disparaître dans le cœur de l'été »*, poursuit l'hydrologue. Les modèles décrivent un climat du XXIe siècle où les volumes de pluies ne seront pas nécessairement moindres. Mais les précipitations seront plus courtes et plus violentes. Les sols se ravinent et, surtout, les argiles des pentes se gonflent d'eau et ne retiennent plus les roches. C'est ce qui est arrivé le 27 août 2023, où 12 000 m³ de matériaux ont bloqué l'autoroute A43 et la voie ferrée Lyon-Modane en vallée de Maurienne. Et à nouveau, le 1er février dernier, deux gros blocs ont barré l'autoroute d'accès à la vallée de la Tarentaise.

Les effondrements en montagne se multiplient

Le changement climatique accélérerait donc l'érosion en montagne. *« Au-dessus de 3500 mètres, on constate un réchauffement de 1 °C du permafrost des parois rocheuses, qui sont ainsi déstabilisées par le dégel d'un englacement qui était auparavant permanent »*, assure Ludovic Ravanel, chercheur à l'université de Savoie. Les effondrements se multiplient. En 2005, la face ouest de l'aiguille des Drus a perdu 292 000 m³ de pierre. Une paille à côté des 3,1 millions de mètres cubes de matériaux qui ont submergé la vallée de Bondo, en Suisse, le 23 août 2017, causant la mort de huit personnes. *« À l'automne 2024, nous avons constaté un éboulement de 700 000 m³ au mont Pourri dans le massif de la Vanoise,* raconte Ludovic Ravanel. *Peut-être assistons-nous à une accélération de ces événements. »*
Difficile aujourd'hui de dire si les laves torrentielles, effondrements rocheux, écoulements torrentiels se propagent, car en France, seul le massif du mont Blanc fait l'objet d'un suivi scientifique. En Suisse et en Autriche, les zones les plus habitées sont également surveillées. Mais partout ailleurs, dans ces milliers de petits bassins-versants peu accessibles au sein d'un arc alpin de 1000 km de long pour 400 km de large, difficile de mesurer réellement les évolutions. *« C'est pourquoi nous tentons aujourd'hui de construire un réseau d'observateurs du relief un peu partout sur le massif alpin »*, conclut Ludovic Ravanel. ■

Loïc Chauveau



JEAN-CLAUDE MOSCHETTI / GÉOSCIENCES RENNES / CNRS IMAGES

La chercheuse du CNRS Laure Guérit expérimente le transport des graviers par les rivières sur des versants types construits en 3D.

MODÉLISATION

Comprendre les interactions entre relief, eau et climat

Pour saisir comment se comporte une lave torrentielle, la modélisation s'avère indispensable. *« C'est le seul moyen d'étudier le comportement de trois types de lave : les boueuses chargées en sédiments, les granulaires — où la composition en sable et roches est plus importante — et les fluides où l'eau prédomine »*, détaille Clément Misset, de l'Office national des forêts. Selon leur composition, les laves atteignent des zones plus ou moins larges, ce qui permet d'anticiper des impacts éventuels sur des biens et de mieux délimiter les interdictions d'aménagement. Au laboratoire de géosciences de l'université de Rennes, Laure Guérit, chercheuse CNRS, construit ainsi en 3D des versants types où elle peut faire varier la granulométrie des matériaux (sable, graviers fins) et le débit de l'eau. *« Ces expériences explorent comment une perturbation climatique ou tectonique, simulée par un changement des flux ou de la taille des grains de sable ou de gravier utilisés, est transmise et enregistrée par les sédiments »*, explique-t-elle. À petite échelle, ce sont les transports des graviers par les rivières qui sont ainsi reconstitués pour comprendre les interactions complexes entre le relief, le travail de l'eau, le climat et l'occupation naturelle ou anthropique des territoires.

Fleurs de feux : la vie sous la pollution

L'artiste Anaïs Tondeur a consacré aux plantes qui poussent sur de gigantesques décharges en Italie un impressionnant travail conjuguant photographie et vision écologiste, botanique et chimie.

Sur le sol souillé de cendres toxiques d'une immense décharge à ciel ouvert, investie par la mafia dans la région de Naples (Italie) et nommée Terre des feux, elles continuent de pousser. *Alliaria petiolata, Taraxacum, Eucalyptus camaldulensis, Ipomoea nil, Sonchus oleraceus, Scrophularia peregrina, Arum italicum, Valeriana officinalis, Rubus plicatus*… Ces plantes dites rudérales (du latin *rudus*, *ruderis*, signifiant « masse brute, décombre, ruine ») prennent racine dans les espaces ravagés par les activités humaines. Terre des feux (*Terra dei fuochi*) désigne la géographie d'un cauchemar environnemental et d'un scandale sanitaire et politique survenu dans les années 2000, alors que les « écomafias » actives dans le *business* du traitement sauvage des déchets jetaient leur dévolu sur ces terrains pour y enfouir ou brûler toutes sortes de dépôts ultratoxiques provenant de toute la péninsule.

Anaïs Tondeur, lauréate 2023 du prix Photographie & Sciences avec le projet « Fleurs de feux » exposé à Strasbourg, a consacré aux plantes rudérales italiennes un impressionnant travail. Elle y conjugue photo et vision écologiste, botanique et chimie, et une philosophie du végétal fondée sur des échanges respectueux avec le vivant, incarnée par Michael Marder, professeur de recherche en philosophie à l'université du Pays basque à Bilbao, en Espagne (auteur de *La pensée végétale. Une philosophie de la vie des plantes,* Les presses du réel).

ANAÏS TONDEUR

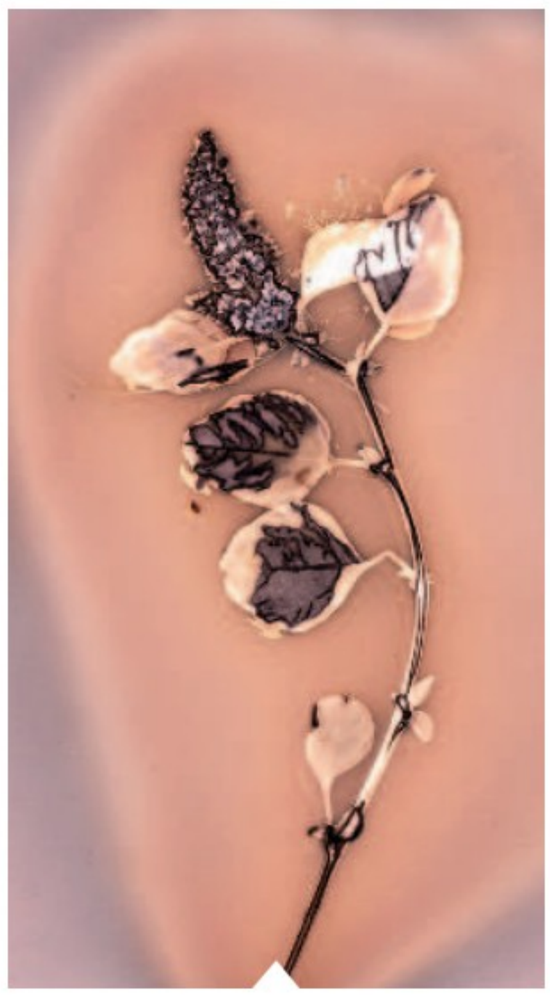
Montage de la tente autour de la plante choisie par Anaïs Tondeur pour la réalisation d'une phytographie.

Anaïs Tondeur s'était déjà confrontée aux plantes irradiées par l'atome dans sa série « Tchernobyl Herbarium ». Avec Fleurs de feux, il s'agissait d'entrer en résonance avec la pérennité d'adventices installées en milieu extrême, dont la présence est documentée dans cette zone depuis l'éruption du Vésuve qui a enseveli Pompéi en l'an 79. Les deux archéobotanistes du Laboratoire de recherches appliquées du Parc archéologique de Pompéi, rencontrées par la photographe, ont identifié dans les ruines de la cité romaine des restes carbonisés de végétaux appréciés pour leurs vertus médicinales ou gustatives. C'est la mise en valeur de ce fil ininterrompu d'interdépendances entre humains et végétaux qui constitue le socle de réflexion du philosophe et de l'artiste. Ces connexions sont figurées à la fois par les dangers concrets d'une vie exposée à la pollution et par des formes de résistance : les végétaux persistent et contribuent à la phytoremédiation grâce au filtrage de certains polluants par leurs racines. Et les militants écologistes se bagarrent depuis des décennies pour faire reconnaître la dangerosité d'habiter la Terre des feux.

Un protocole reposant sur les propriétés du végétal

L'artiste est venue sillonner cette région pour récolter les traces de neuf plantes rudérales, accompagnée aussi bien par des spécialistes que par des activistes. Son intention n'était pas de « prendre » des photos, mais de collecter les empreintes des végétaux sans les arracher du sol. Le choix de réaliser des phytographies, selon un dispositif qui implique de mettre la plante en

« Urtica ».



« Parietaria officinalis ».

« Alliaria petiolata ».

« Taraxacum ».

ANAÏS TONDEUR, 2024. AVEC SPOT HOME GALLERY, PROGRAMME MIRA!/INSTITUT FRANÇAIS, STIMULTANIA, ADAGP, MINISTÈRE DE LA CULTURE, CNRS.

contact direct avec un support photosensible, découle d'une connaissance de la chimie des plantes dont Anaïs Tondeur a voulu préciser les détails auprès de Zoran Cerovic, spécialiste de biologie végétale (anciennement rattaché au laboratoire Écologie, systématique et évolution, université Paris-Saclay). *« Les phénols jouent un rôle de défense très important chez les plantes, dont un grand nombre répond à la contamination d'un sol par la production de polyphénols,* explique le scientifique. *Ces molécules changent de couleur en présence d'oxygène, elles agissent comme des pigments et des révélateurs d'images. La couleur des phytographies d'Anaïs dépendait dès lors de la quantité et du type de polyphénols contenus par la plante.* » Anaïs Tondeur a en effet mis au point un protocole reposant sur les propriétés intrinsèques du végétal : elle a d'abord dynamisé la production naturelle de phénols de la plante en l'arrosant d'un mélange d'eau, de vitamine C et de cendres. Ensuite, protégée par une tente érigée pour doser l'exposition à la lumière, la plante choisie prend le temps d'imprimer ses formes, et le degré même de sa réaction au milieu hostile dans lequel elle perdure, sur le support sensible, papier ou textile.

Un travail d'enquête pluridisciplinaire

L'implication de Michael Marder confère au projet une tournure de performance, intimement raccordée à la vision poético-philosophique de l'artiste. Anaïs Tondeur envoie les impressions des neuf plantes « rencontrées » au philosophe, lequel en retour adresse à chacune une lettre, que l'artiste, revenue au chevet des végétaux, leur lira. Durant la lecture de la missive, l'artiste mettra en place une nouvelle phytographie, afin que ce cercle d'interactions vertueuses s'accomplisse. On pourrait être tenté de ne voir dans ce protocole qu'une bizarrerie artistique, si ces gestes performatifs n'étaient portés par de fortes valeurs éthiques, et ne venaient de surcroît couronner un véritable travail d'enquête pluridisciplinaire, mené sur le terrain et dans les labos. *« Ce que je poursuis, c'est notre lien fondamental au vivant, la communion que nous pouvons établir avec le monde grâce à nos expériences sensibles ou poétiques »*, écrit cette artiste, aussi douce et tenace qu'une rudérale. ■

Andreina De Bei

POUR EN SAVOIR PLUS

Le projet photographique et performatif *Fleurs de feux* sera exposé du 16 mai au 20 septembre à Stimultania, pôle de photographie à Strasbourg qui a soutenu cette réalisation. L'artiste est lauréate 2023 du prix Photographie & Sciences (lancé par la Résidence 1+2 Toulouse), dont *Sciences et Avenir* est partenaire.

SCIENCES ET AVENIR PARTENARIAT

SHUTTERSTOCK

Dans les cas les plus graves, la paroi de l'intestin peut être inflammée par une défaillance du système immunitaire, des problèmes génétiques ou même des facteurs environnementaux. Un diagnostic précoce évitera une intervention chirurgicale (vue d'artiste).

Intestins

Comprendre et combattre les maux du ventre

De nombreux Français souffrent de ballonnements, de douleurs abdominales ou de constipation : des symptômes variés qui recouvrent des affections diverses. Des prises en charge innovantes existent pour les formes bénignes comme le syndrome de l'intestin irritable, tandis que la recherche progresse pour traiter les maladies plus handicapantes telles que les Mici.

Par Sylvie Riou-Milliot

Douleurs abdominales, spasmes, diarrhée, constipation, ballonnements, inconfort digestif… Autant de maux parfois tabous à évoquer qui, selon leur degré de sévérité, peuvent lourdement affecter les activités sociales, professionnelles et la qualité de vie des très nombreuses personnes qui en souffrent. Deux groupes de patients sont concernés. D'une part, ceux atteints du syndrome de l'intestin irritable (SII), soit environ 5 à 10 % de la population. D'autre part, les 300 000 malades en France concernés par les Mici (maladies inflammatoires chroniques intestinales), soit la maladie de Crohn et la rectocolite hémorragique.

Syndrome de l'intestin irritable et Mici constituent deux entités bien distinctes. Dans le premier cas, la maladie est bénigne car aucune lésion digestive n'est constatée. Dans le second en revanche, les examens d'imagerie mettent en évidence de franches ulcérations de la muqueuse digestive. Si elles sont liées à une dérégulation du système immunitaire intestinal, leur origine reste à ce jour mal comprise. Mais le risque de cancérisation et de complication peut parfois nécessiter une intervention chirurgicale. Néanmoins, dans tous les cas, des prises en charge existent et la recherche continue de progresser. Ainsi, s'agissant du syndrome de l'intestin irritable, le premier essai français de transplantation de microbiote fécal va démarrer avant la fin de l'année *(lire p. 56)*. Pour les Mici, ce sont de nouvelles biothérapies qui sont mises au point : des médicaments innovants administrés de plus en plus tôt afin de retarder au maximum l'évolution des lésions *(lire p. 58)*.

SYNDROME DE L'INTESTIN IRRITABLE

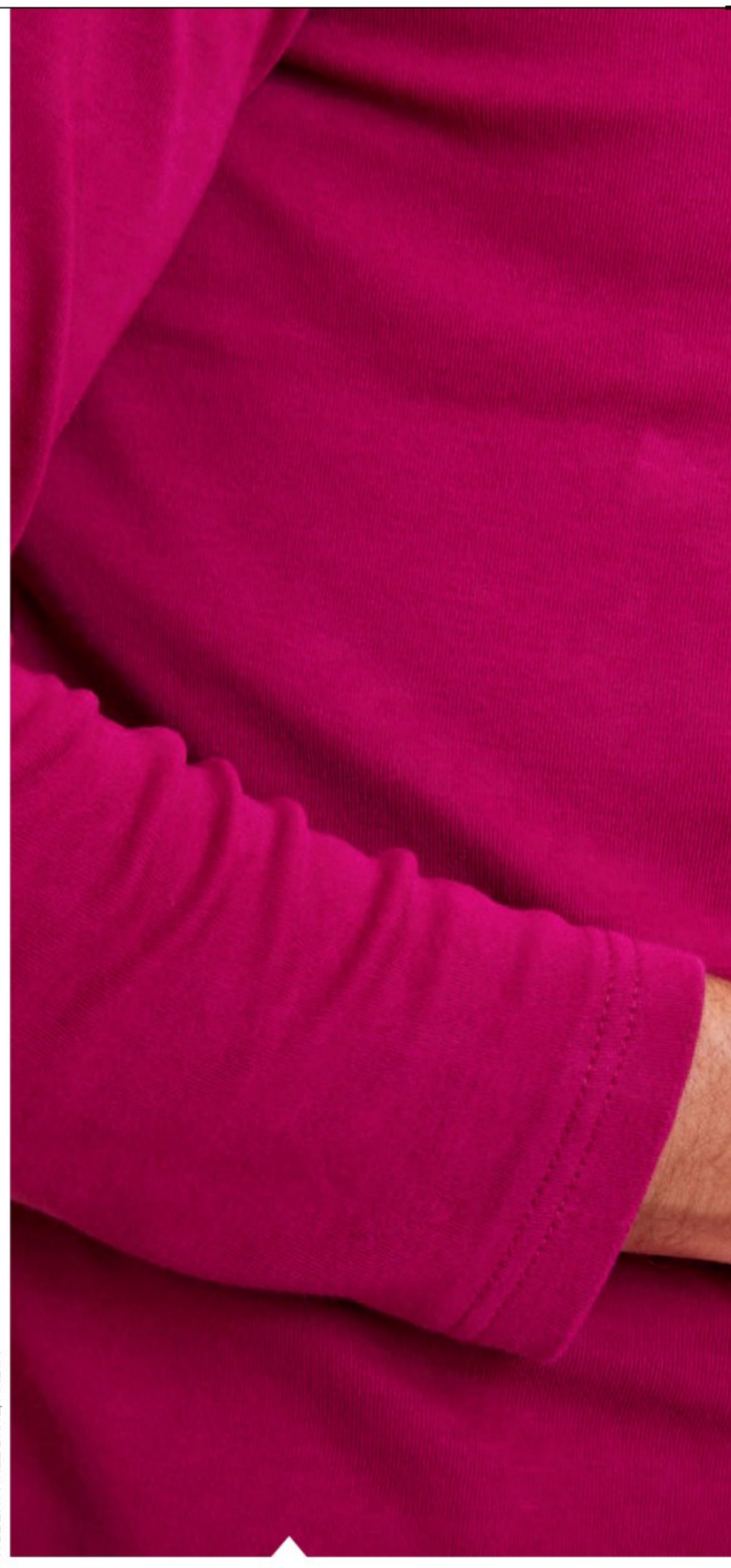
Multiplier les approches pour soulager

D'un côté, de très nombreux patients exprimant de fréquentes plaintes. De l'autre, des médecins qui, à la suite des comptes rendus toujours négatifs des examens, assurent qu'*« il n'y a rien »*, que *« ce n'est pas grave »* et que *« c'est dans la tête »*. Ainsi tourne le monde du syndrome de l'intestin irritable (SII) ou colopathie fonctionnelle. Résultat : des malades en manque d'écoute et d'empathie, ballottés entre nomadisme médical et errance diagnostique, avec de graves retentissements sur leur qualité de vie. Un patient sur quatre est ainsi atteint d'une forme sévère. *« On sait aujourd'hui que le syndrome de l'intestin irritable n'a rien de psychosomatique, même si les facteurs psychologiques (stress, anxiété) peuvent en accentuer les symptômes. Les causes multiples de cette maladie demeurent partiellement identifiées »*, précise le Pr Jean-Marc Sabaté, gastro-entérologue à l'hôpital Avicenne, à Bobigny. Bien qu'il n'existe à ce jour aucun marqueur fiable permettant d'affirmer la maladie, le diagnostic fondé sur un interrogatoire du patient est aisé — le recours à la coloscopie avant 45 ans étant considéré comme inutile. Parfois, en cas de doute, des tests (sanguins, fécaux) permettent d'affirmer l'absence d'inflammation, ce qui permet d'éliminer le diagnostic de Mici et de rassurer les patients. Parfois en vain, ceux-ci étant tentés par la réalisation d'autres tests tels que l'analyse du microbiote, pourtant jugée inutile *(lire l'encadré ci-dessous)*.

Des probiotiques pour agir sur la flore intestinale

Bien que la recherche sur le syndrome de l'intestin irritable soit moins active que pour les Mici, les connaissances progressent à petits pas, et différents mécanismes expliquant la survenue des symptômes sont aujourd'hui connus : hypersensibilité intestinale, motricité digestive perturbée, déséquilibre du microbiote (dysbiose), anomalies de la perméabilité intestinale, perturbation du contrôle des messages douloureux..., plusieurs d'entre eux pouvant d'ailleurs être présents chez un même patient. D'où la nécessité de multiplier les approches, en plus du recours aux médicaments (il existe une vingtaine de molécules différentes).

C'est tout l'intérêt des séances d'éducation thérapeutique pratiquées dans certains hôpitaux comme Lyon, Bobigny, Bordeaux, Nice et Rouen *(lire l'encadré p. 57)*. Elles proposent des solutions validées (séances d'hypnose, thérapies cognitivo-comportementales, méthodes de gestion du stress, travail sur les émotions...) qui, en association avec les traitements médicaux, permettent d'obtenir une amélio-



ROBERT KNESCHKE/ANDIA

5 à 10 % de la population française souffrent du syndrome de l'intestin irritable.

ANALYSE

Prudence avec les tests

Proposés par différents laboratoires pour une centaine d'euros voire plus, les tests d'analyse du microbiote sont inutiles, estime la Société nationale française de gastro-entérologie. Aucun consensus scientifique n'a validé à ce jour la notion de microbiote sain. Même prudence avec les tests respiratoires, selon les recommandations récentes du Groupe français de neuro-gastro-entérologie : *« Ils analysent des gaz expirés (hydrogène, méthane) après ingestion de glucose, mais leur fiabilité est encore incertaine et leurs conditions de réalisation restent à standardiser »*, précise le Pr François Mion, des Hospices civils de Lyon.

PRISE EN CHARGE

À l'école du ventre

« *J'ai mal depuis 10 ans, j'ai tout essayé* », Maelle, 33 ans. « *On me répète que c'est dans la tête* », Bernadette, 67 ans. « *Je ne mange plus rien, j'ai perdu 10 kg* », Alix, 30 ans. Quelques paroles prononcées lors du tour de table de l'atelier d'éducation thérapeutique proposé par l'École du ventre (hôpital Édouard-Herriot, Lyon) dans le service de gastro-entérologie du Pr François Mion. Depuis 3 ans, ces rencontres incluant le dispositif dit PEPS (Partenariat et expérience patient en santé) sont proposées en hôpital de jour. Une particularité : la présence d'une « patiente experte » désormais guérie, Alexandra, qui raconte aux participantes son propre parcours semé d'embûches.

De 9 à 17 heures, un médecin formé aux techniques de régulation émotionnelle anime la journée au cours de laquelle plusieurs intervenants se succèdent. D'abord, une séance de méditation pratiquée en groupe par un médecin spécialiste de la douleur. Puis le chef de service (qui a vu auparavant les patients en consultation individuelle) intervient pour parler physiologie et microbiote. Enfin, une diététicienne donne des repères et oriente vers les aliments les plus adaptés en fonction des troubles et des préférences alimentaires de chacune. Temps d'échanges entre les participantes et la patiente experte, partage d'informations, apprentissage de techniques simples de gestion du stress… sans oublier le repas confectionné par les intervenants (option sans gluten ni lactose possible pour les plus sensibles). Ici, pas de jugement mais de la bienveillance et de l'écoute attentive pour informer, déconstruire les idées reçues et, surtout, rassurer.

À l'hôpital Avicenne (Bobigny), une autre démarche, plus individuelle, est proposée. Pendant une journée, les patients rencontrent séparément trois spécialistes (gastro-entérologue, psychologue, diététicienne) avant de recevoir en fin de journée un bilan personnalisé.

ration dans environ 60 % des cas. Autre possibilité : le recours aux probiotiques pour agir sur la flore intestinale. « *Dans ce domaine, les études sérieuses randomisées contre placebo sont assez rares et ceux qui remplissent ces critères ne sont pas nombreux* [Smebiocta, Florvis, Kimijea, Alflorex], détaille Jean-Marc Sabaté. *Prescrits sous forme de cure, ils peuvent néanmoins aider certains patients.* »

Autre sujet au cœur des préoccupations : le contenu des assiettes, scruté de manière parfois obsessionnelle par des malades qui établissent une responsabilité directe entre un aliment en particulier et le déclenchement des symptômes. D'autres se croient, souvent à tort, « allergiques » ou intolérants — en réalité plutôt hypersensibles — au gluten, au lactose, au fructose, etc. Or, au lieu de s'orienter vers une alimentation diversifiée, ils s'imposent des restrictions excessives qui peuvent conduire à des troubles du comportement alimentaire et à des carences. D'où l'importance d'un accompagnement nutritionnel par une diététicienne. Exemple avec le régime dit sans Fodmaps établi depuis plus de 20 ans par des chercheurs australiens de la Monash University. Les Fodmaps (Fermentable by colonic bacteria oligosaccharides, disaccharides, monosaccharides

A. DERBEYS/MYOP

« Le syndrome de l'intestin irritable n'a rien de psychosomatique, même si le stress et l'anxiété peuvent en accentuer les symptômes »

Pr Jean-Marc Sabaté, gastro-entérologue à l'hôpital Avicenne (Bobigny)

and polyols) sont un groupe de sucres présents à l'état naturel dans de très nombreux aliments. Fréquemment mal absorbés chez les patients les plus sensibles, ils sont sources de ballonnement et d'inconfort. Différentes stratégies alternant pauses temporaires puis réintroduction, parfois complexes à gérer, nécessitent ainsi un accompagnement.

120 patients vont tester la greffe fécale

Face aux formes sévères (25 % des cas) du syndrome de l'intestin irritable, souvent rien ne fonctionne. C'est pour ces patients que va bientôt démarrer le premier essai français de transplantation de microbiote fécal. Sans cesse reporté depuis la pandémie de Covid-19, *« il sera lancé avant la fin de l'année dans dix centres en France et concernera 120 patients, dont 35 sont déjà sur liste d'attente »*, précise Jean-Marc Sabaté, qui coordonnera l'étude. L'objectif sera de modifier le microbiote des patients après une greffe issue de donneurs ne se plaignant d'aucun symptôme digestif. L'étude prévoit de comparer deux groupes de patients, l'un recevant oralement des capsules (environ 50 en deux prises sur 24 heures, soit l'équivalent de 25 g de selles) confectionnées à partir de selles congelées de donneurs, l'autre une transplantation de microbiote fécal placebo. Les critères de positivité de l'étude s'appuieront sur des questionnaires remplis trois mois après la transplantation pour évaluer son effet sur le nombre de jours passés sans douleurs abdominales ni ballonnements et sur d'éventuelles améliorations du transit (moins de diarrhée ou de constipation).

Autre piste de recherche : la mise au point de médicaments ciblant le système nerveux central plutôt que l'intestin. Des travaux japonais publiés en avril dans la revue *British Journal of Pharmacology* et menés chez la souris envisagent que des molécules dites agonistes des récepteurs delta morphiniques puissent aider à soulager les symptômes du syndrome de l'intestin irritable. Si la maladie n'est pas que dans la tête, elle se soulage bien en visant l'axe intestin-cerveau. ■

MALADIES INFLAMMATOIRES CHRONIQUES

Retarder l'évolution des lésions grâce aux biothérapies

Mici. Quatre lettres pour parler des maladies inflammatoires chroniques de l'intestin (la maladie de Crohn et la rectocolite hémorragique). Des maladies invalidantes et incurables qui se traduisent par des ulcères dans la paroi de l'intestin (grêle, colon, rectum) pouvant se perforer. Dix millions de personnes sont concernées dans le monde, et 300 000 en France. Soit 8000 nouveaux cas par an, près d'un patient par heure. Les Mici sont un problème de santé publique doublé d'une énigme. Car, d'une part, on ne sait que stabiliser ces maladies hétérogènes dont l'impact psychologique, social et professionnel peut être considérable, et, d'autre part, on ne les comprend pas encore très bien.

Entièrement consacré aux Mici, l'institut hospitalo-universitaire (IHU) Infiny a été lancé à Nancy en 2023. Placé sous la direction du Pr Laurent Peyrin-Biroulet, il a notamment pour objectif l'amélioration de la prise en charge des Mici, les traitements actuels ne permettant l'obtention d'une rémission que chez un patient sur cinq. D'où l'idée de pouvoir diagnostiquer et, donc, traiter plus tôt les patients, avant que les dégâts sur leur intestin ne soient trop évolués, et de réduire ainsi le nombre d'hospitalisations et d'interventions chirurgicales parfois invalidantes. Les travaux conduits au sein de l'institut devront également aider à décrypter les mécanismes de la maladie et faire la part entre susceptibilité génétique (plus de 170 gènes connus), facteurs environnementaux (pollution, alimentation ultra-transformée), tabac, ou encore interactions entre flore intestinale (le microbiote) et système immunitaire.

Un diagnostic fiable pour identifier une inflammation

Historiquement apparues dans les pays occidentaux après la révolution industrielle, les Mici sont des maladies capricieuses dont la particularité est d'évoluer

ENVIRONNEMENT

La qualité des sols jouerait un rôle

Et si les Mici étaient liées à la qualité des sols ? Pour la première fois, cette observation étayée par les travaux du groupe Epimad fait l'objet de recherches reposant sur l'analyse des sols (mais aussi de l'air et de l'eau) dans le nord de la France. Conduites par l'équipe du Pr Annabelle Deram (Laboratoire de génie civil et de géo-environnement, à Lille), elles ont établi des liens entre la maladie et certains types de cultures intensives (lin, betterave, orge, pomme de terre, blé), ou avec la présence de différents métaux (molybdène, nickel) dans les prélèvements de terre. Des données qui restent à confirmer.

BURGER/PHANIE

La coloscopie est une technique d'endoscopie qui permet de révéler les ulcérations de la muqueuse digestive (ici au CHU de Limoges).

entre des phases de poussées imprévisibles plus ou moins sévères et des phases de calme. Dans l'Hexagone, c'est le registre Epimad, une référence mondiale couvrant quatre départements du Nord, soit 6 millions de personnes (9 % de la population), qui assure la surveillance épidémiologique. Selon une étude menée sur ce registre pendant trente ans, récemment publiée dans la revue *The Lancet*, l'incidence a augmenté d'environ 1,5 % entre 1988 et 2017. Et elle est plus importante chez les enfants et les femmes. *« En 2030, près de 0,6 % de la population pourrait être atteint de Mici »*, concluent les auteurs de l'étude. Si on comprend encore mal la raison de cette incidence, une piste se dessine concernant la pollution des sols *(lire l'encadré ci-contre)*.

En attendant d'en savoir plus sur les causes de ces maladies, d'importantes avancées ont été réalisées sur le plan du diagnostic. Il est ainsi devenu possible de discriminer les Mici d'un syndrome de l'intestin irritable avec différents tests (sanguins, fécaux) qui permettent d'établir l'existence d'une inflammation. Les zones ulcérées sont ensuite localisées grâce aux examens d'imagerie (endoscopie, IRM abdominale). Les progrès sont également notables sur le plan des traitements. Longtemps cantonnés aux seuls corticoïdes et à la chirurgie, ceux-ci reposent désormais sur les biothérapies. Ces dernières avaient été initialement développées pour d'autres maladies : des affections, inflammatoires et cutanées (rhumatisme articulaire aigu, spondylarthrite ankylosante, psoriasis…), parfois présentes en association avec les Mici, ayant toutes en commun la mise en jeu de mécanismes inflammatoires. Pour la plupart administrés par voie intraveineuse ou sous-cutanée, ces médicaments bloquent des cibles impliquées dans le déclenchement de l'inflammation (TNF alpha, lymphocytes, interleukines 10, 23, cytokines, etc.). Ils permettent ainsi de stopper ou au moins de réduire l'inflammation de la muqueuse digestive. Ces médicaments très puissants ne sont hélas pas encore tous disponibles en France, déplore le Getaid (Groupe d'étude thérapeutique des affections inflammatoires du tube digestif).

L'enjeu, pour les spécialistes, est désormais d'appliquer au mieux le concept du « treat to target » (traitement ciblé), qui consiste à trouver pour chaque malade la meilleure combinaison pour soulager les symptômes tout en réduisant la fréquence et la gravité des poussées. Pour encore plus d'efficacité, l'heure est déjà aux « combithérapies », c'est-à-dire aux associations de molécules. De nombreuses recherches sont par ailleurs en cours pour comprendre pourquoi certains patients (30 %) ne répondent pas aux biothérapies, et pourquoi leur effet biologique peut s'épuiser. Encore plus futuriste, la mise au point d'un test sanguin pour prédire l'apparition des Mici jusqu'à seize ans avant l'apparition des signes. C'est tout l'enjeu de travaux récents de chercheurs suédois publiés dans la revue de référence *Gastroenterology*. Peut-être permettront-ils d'intervenir encore plus précocement pour éviter à terme la survenue des lésions. Ce serait un soulagement pour les patients. ■

POUR EN SAVOIR PLUS

Association côlon irritable
▸ https://apssii.org

Association Mici
▸ www.afa.asso.fr

Institut Mici
▸ www.ihu-infiny.fr

L'incroyable lenteur de notre cerveau

Alors que notre cerveau peut capter plusieurs milliards d'informations par seconde, il n'en traite qu'une quantité minuscule. C'est ce paradoxe qu'a mis en lumière une récente étude menée par des chercheurs californiens. Or, cette méthode de calcul ne fait pas l'unanimité dans la communauté scientifique. Décryptage.

À quelle vitesse tourne le cerveau humain ? Voilà la question que se sont posée des neuroscientifiques du California Institute of Technology (Caltech), aux États-Unis. Pour y répondre, ils se sont appuyés sur la théorie de Shannon qui permet de quantifier le contenu en information d'un ensemble de données. Le tout est exprimé en bits. Les chercheurs ont analysé une vaste quantité de littérature scientifique sur les comportements cognitifs humains. Par exemple, pour l'écriture, les dactylographes professionnels tapent en moyenne 120 mots de 5 caractères par minute, soit 10 frappes par seconde équivalant à une vitesse de 10 bits par seconde. Concernant la lecture, les discours les plus compréhensibles contiennent en moyenne 160 mots par minute, soit un débit de 13 bits par seconde. Pour le traitement d'informations plus complexes, le meilleur joueur de Rubik's Cube au monde résout le casse-tête à une vitesse de 11,8 bits par seconde. La mémoire des cartes se limite quant à elle à 17,7 bits par seconde, celle des chiffres à 4,9 bits par seconde. Pour un organe parfois qualifié d'ordinateur le plus puissant au monde, cela paraît très faible ! Les chercheurs furent les premiers surpris par cette lenteur. C'est pourquoi ils ont intitulé leurs recherches *« L'insoutenable lenteur de l'être »* (*« The unbearable slowness of being »*), clin d'œil au célèbre roman de Milan Kundera.

THÉORIE

À la recherche d'un modèle valide

Dans leur étude, les chercheurs californiens présentent une vision informatique pure d'un cerveau qui reçoit des signaux entrants, qui calcule et envoie un signal sortant. Aujourd'hui, beaucoup de neuroscientifiques recherchent un modèle qui tienne compte des nombreuses fonctions que le cerveau gère en permanence, comme la respiration, la digestion, l'équilibre du corps, etc. La première piste est celle du traitement prédictif, selon lequel une grande partie des opérations mentales consiste à prédire le réel. Le cerveau s'économise en récoltant juste ce qu'il faut de signal entrant pour prédire ce qu'il va se passer. Inutile d'avoir une photo d'ultra haute définition d'une poignée pour ouvrir une porte. La deuxième est celle de la cognition incarnée : un modèle théorique qui considère que le comportement humain n'est pas juste le fruit de l'activité cérébrale pure, mais de l'interaction entre le cerveau, le corps et l'environnement. *« Ainsi, le cerveau est peut-être lent par rapport à une calculatrice, mais la calculatrice ne sait pas faire des pâtes à la sauce tomate »*, observe avec humour Albert Moukheiber.

De la pertinence de mesurer en bits la vitesse du cerveau

À titre de comparaison, une connexion Wi-Fi standard permet de traiter 50 millions de bits par seconde. Autre exemple : d'après les chercheurs, la totalité des informations qu'un humain peut apprendre au cours de sa vie tiendrait sur une simple clé USB ! Pourtant, ils rappellent également qu'*« un seul œil peut transmettre 1,6 milliard de bits par seconde »* ! Si l'on ajoute nos autres sens, on arrive à plusieurs milliards d'informations captées par notre cerveau chaque seconde pour finalement n'en traiter qu'une quantité infinitésimale. Des recherches antérieures avaient déjà mis en lumière un écart entre notre processus de pensées et nos systèmes sensoriels. Mais encore fallait-il obtenir des données quantitatives sur le sujet. Voilà qui est chose faite.

YUICHIRO CHINO / GETTY IMAGES

Le cerveau humain traiterait les informations à la vitesse moyenne de 10 bits par seconde « seulement », indique l'étude, tout en contenant plus de 85 milliards de neurones.

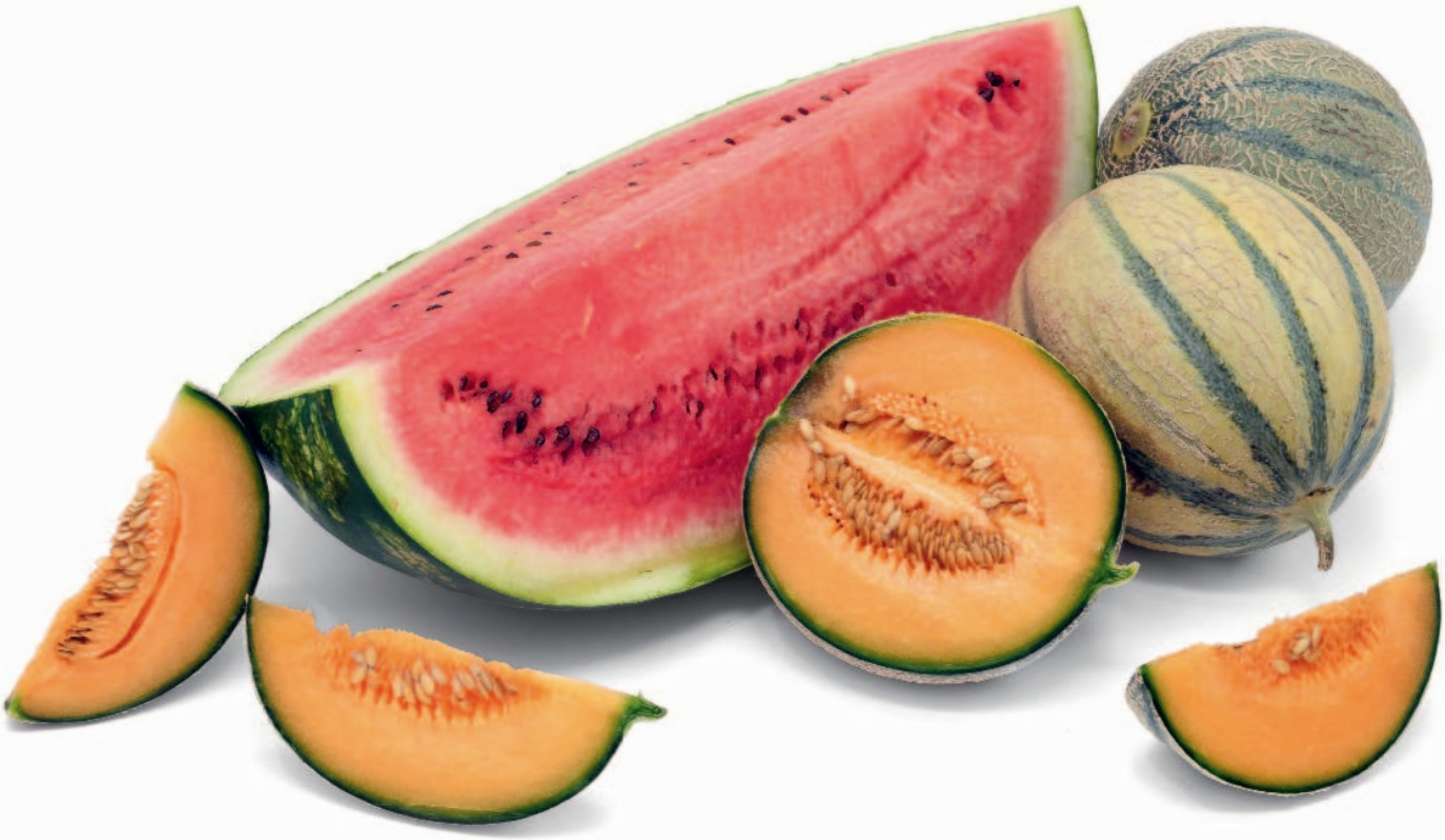
Au sein de la communauté scientifique, l'étude ne fait pas l'unanimité. Première critique : le choix du bit comme unité, comme pour un ordinateur. *« Un bit dans un ordinateur prend la valeur 1 ou 0,* explique le neuroscientifique Albert Moukheiber, auteur du livre *Neuromania* (Allary Éditions, 2024). *Alors que, dans l'étude, on utilise le mot "bit" pour représenter n'importe quel bloc d'information comme une impulsion électrique dans un neurone.* » Pour lui, il faut donc se méfier du parallélisme entre le bit informatique et un bit neuronal, tout comme du parallélisme de rapidité entre le cerveau et l'ordinateur. Première autrice de l'étude, la neurobiologiste Jieyu Zheng rétorque : *« Tout comme nous pouvons mesurer l'eau que nous buvons et l'eau qui coule dans la rivière en litres, nous pouvons bien mesurer la vitesse de notre cerveau en bits. Il s'agit juste d'une unité.* » Selon elle, le cerveau et l'ordinateur *« traitent des informations, même s'ils le font de manière radicalement différente* ». En tout cas, l'étude pose une question cruciale : pourquoi des centaines de millions d'années d'évolution ont-elles abouti à autant de lenteur ? *« On pense que le cerveau est performant, alors qu'il est d'abord robuste* », avance Olivier Hamant, biologiste à l'École normale supérieure de Lyon. Selon lui, notre société est organisée pour être hyperperformante, et nous avons ainsi tendance à tout interpréter sous le prisme de la performance. Or, le vivant n'est ni efficace, ni efficient. Il cherche avant tout à maintenir un système stable malgré les fluctuations, à court terme et à plus long terme. Ce que l'on perçoit notamment avec le cerveau humain : les centaines de millions d'années d'évolution auraient optimisé l'encéphale de manière à le rendre plus robuste, c'est-à-dire adaptable dans le temps. *« Une petite fille de 2 ans peut reconnaître des chiens à partir de trois ou quatre photos d'entraînement, alors qu'une intelligence artificielle en aura besoin de milliers de différentes races, sous différents angles de vue, peut-être aussi de photos de chats et de rats, avant de se montrer capable d'identifier un chien,* illustre Albert Moukheiber. *Finalement, toutes y parviennent mais en ayant suivi des chemins différents.* » Quels chemins utilise le cerveau ? C'est justement le sujet de la prochaine recherche pour les chercheurs californiens : découvrir quels sont les mécanismes neuronaux nous permettant de fonctionner à 10 bits par seconde. De façon juste adaptée à notre survie ! ■

Aurore Braconnier

OLIVIER HAMANT

« On pense que le cerveau est performant, alors qu'il est d'abord robuste »

Olivier Hamant, biologiste à l'École normale supérieure de Lyon



Melon et pastèques, des fruits rafraîchissants

Si de nombreux atouts nutritionnels leur sont communs, chacun de ces fruits possède aussi ses propres particularités.

Fruits stars de l'été, melons et pastèques se disputent la vedette à l'heure de l'apéritif et des pique-niques. De la famille des cucurbitacées, comme les concombres et les courges, les melons de variété cantaloup (charentais et cavaillon) à chair orangée sont sans nul doute les plus connus. Mais il en existe d'autres variétés tout aussi rafraîchissantes : le melon canari reconnaissable à sa forme ovale et jaune vif, le Galia, à la chair verte ou encore le Honey Dew (ou melon miel), un fruit crème à la pulpe vert pâle. Pour les pastèques, ce sont les variétés Crimson Sweet, Sugar baby et Charleston Grey qui sont les plus répandues sur les étals.

Une grande variété de parfums

Plus de 500 différents composés volatils (esters, aldéhydes, terpénoïdes, etc.) ont été identifiés dans le melon, donnant à chaque variété sa typicité. Par exemple, les esters offrent des notes fruitées et sucrées et les aldéhydes, des arômes frais. Certaines variétés de melon (cantaloup, Galia, Dudaim) sont très aromatiques, avec une richesse en ester éthylique, tandis que les variétés Piel de Sapo (un melon vert de forme ovale), Canari et Honey Dew, considérées comme moins aromatiques, sont, elles, riches en aldéhydes dérivés d'acides gras (1). 32 composés volatils (géranial, néral, dérivés du lycopène, etc.) sont aussi responsables de l'odeur de la pastèque.

301 000
tonnes de melon
récoltées en France en 2024

23 510
tonnes de pastèques
récoltées en France en 2023, principalement en Guyane et en région Provence-Alpes-Côte d'Azur.

(SOURCES : FRANCE AGRIMER ET AGRESTE.)

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR

CITRULLINE Acide aminé qui n'est pas un constituant des protéines. La citrulline est en revanche le précurseur d'un acide aminé essentiel, l'arginine, que le corps ne sait pas fabriquer.

BÊTA-CAROTÈNE Pigment naturel antioxydant appartenant à la famille des caroténoïdes. On le trouve dans divers végétaux de couleur orange ou verte (carotte, patate douce, épinard, persil, etc.).

FODMAPS De l'anglais « Fermentable by colonic bacteria oligosaccharides, disaccharides, monosaccharides and polyols ». Soit des glucides (lactose, fructose, fructane, etc.) présents dans de nombreux produits (lait, fruits, oignons, ail, poireaux, échalotes, légumineuses, etc.).

Ils font baisser la pression artérielle

100 g de melon cantaloup fournissent 380 mg de potassium, contre 100 mg pour 100 g de pastèque. Ce minéral facilite la contraction musculaire et aide à contrôler la tension artérielle en équilibrant une alimentation trop riche en sodium qui élève la pression dans les artères. La pastèque est une source importante de **citrulline** (0,7 à 3,6 g par kilogramme de pulpe selon l'espèce et le degré de maturité) (2), bonne pour la santé vasculaire. Des études ont montré que cet acide aminé non essentiel pouvait aider à réduire la tension artérielle en favorisant la relaxation des vaisseaux sanguins (3).

Ils renferment des antioxydants

Une tranche de 100 g de melon à pulpe orange (cavaillon et charentais) apporte 2,5 mg/100 g de **bêta-carotène**, la pastèque 1,22 mg/100 g, contre seulement 30 microgrammes pour le Honey Dew. Cet antioxydant de la famille des caroténoïdes protège la peau contre les rayons ultraviolets et se transforme en vitamine A dans l'organisme. Ces fruits abritent d'autres pigments spécifiques : dans le melon, on trouve de la lutéine, qui préserve les yeux de la cataracte et de la DMLA ; dans la pastèque, notamment dans son jus, du lycopène, protecteur des maladies cardio-vasculaires ainsi que des flavonoïdes (4). Ces fruits apportent aussi de petites quantités de calcium (11 mg/100 g pour le melon charentais cantaloup) et de vitamine C (16,8 mg/100 g de Honey Dew) ainsi que 18 % des besoins journaliers pour un adulte en vitamine B9 (acide folique), impliquée dans le renouvellement cellulaire (5).

Moins de sucre que dans le raisin

Avec une teneur en eau avoisinant les 84 à 91 %, melons et pastèques complètent les apports hydriques en période estivale. La pastèque est moins calorique que le melon à chair orange (39 kcal/100 g contre 63 kcal/100 g) en raison de sa plus faible teneur en sucre (8 g/100 g), principalement du fructose. Une tranche (100 g) de melon à chair orange apporte en effet 10,6 g/100 g, pour une large majorité du saccharose (composé de molécules de fructose et de glucose) qui s'accumule au fur et à mesure de la maturation du fruit. C'est plus que la fraise (5,6 g/100 g) ou l'abricot (6,7 g/100 g), mais moins que la banane ou le raisin chasselas, qui apportent entre 15 et 17 g de sucre pour 100 g.

De rares allergies

Comme de nombreux fruits, le melon et la pastèque peuvent provoquer des réactions allergiques croisées chez les personnes sensibles à certains pollens (ambroisie, fléole des prés, dactyle), avec des symptômes situés autour de la zone orale et respiratoire (asthme). L'allergie au melon peut aussi être en lien avec une sensibilité au latex. Par ailleurs, deux nouveaux allergènes ont récemment été découverts (alpha-galactosidase et GRP78) dans l'allergie alimentaire à la pastèque (6). ■

Sylvie Boistard

FLORENCE FOUCAUT
Diététicienne-nutritionniste à Paris

La pastèque est riche en Fodmaps

« Le melon apporte près de trois fois plus de fibres que la pastèque, mais il s'agit de faibles quantités (1,3 g/100 g). La pastèque est en revanche un fruit riche en **Fodmaps**, des sucres mal absorbés au niveau de l'intestin grêle et fermentés par les bactéries intestinales dans le côlon. Chez certaines personnes sensibles souffrant du syndrome de l'intestin irritable *(lire p. 50)*, leur consommation peut favoriser des gaz, des ballonnements et des douleurs digestives. Il est alors conseillé selon sa tolérance digestive d'en diminuer les quantités ingérées et de choisir plutôt le melon qui en contient moins, sans dépasser une portion de 90 g par jour (7). »

(1) A matter of smell: the complex regulation of aroma production in melon, Mayobre C. et al, *Food Chemistry*, 2024.

(2) Determination of citrulline in watermelon rind, Rimando AM. et al, *Journal of Chromatography A*, 2005.

(3) L-citrulline supplementation : impact on cardiometabolic health, Allerton TD. et al, *Nutrients*, 2018.

(4) Effect of storage temperature on physico-chemicals, phytochemicals and antioxydant properties of watermelon juice, Mohamad Salin NS. et al, *Métabolites*, 2022.

(5) Table nutritionnelle Ciqual, Anses.

(6) Two new allergens in watermelon allergy, Carpio-Escalona LV. et al, *Journal of Investigational Allergology and Clinical Immunology*, 2023.

(7) Université de Monash, à Melbourne (Australie).

Comment Sapiens a conquis le monde

Favorisé par son cerveau, H. sapiens a développé une capacité d'adaptation hors norme qui l'a conduit à coloniser tous les espaces et environnements, y compris les plus hostiles, tandis que les autres « Homo » disparaissaient. Retour sur cette fascinante odyssée.

Dossier réalisé par
Rachel Fléaux et
William Rowe-Pirra

SIMON CHRISTENSEN/ MOESGAARD /MOESGAARDMUSEUM.DK

ANALYSE
7 atouts qui ont fait le succès de notre espèce p. 66

EXPANSION
Les multiples sorties d'Afrique de Sapiens p. 74

FAMILLE
Le cercle des « Homo » disparus p. 78

ENTRETIEN
Évelyne Heyer, professeure au Muséum national d'histoire naturelle p. 82

Reconstitution de l'« Homo sapiens » mis au jour sur le site de Jebel Irhoud, au Maroc, exposée au musée Moesgård, au Danemark.

7 atouts qui ont fait le succès de notre espèce

8,2 milliards d'habitants, une expansion planétaire. Sapiens est désormais la seule espèce sur Terre, après la disparition de ses cousins. La conquête ne s'est pas faite sans difficultés, mais notre ancêtre avait quelques atouts.

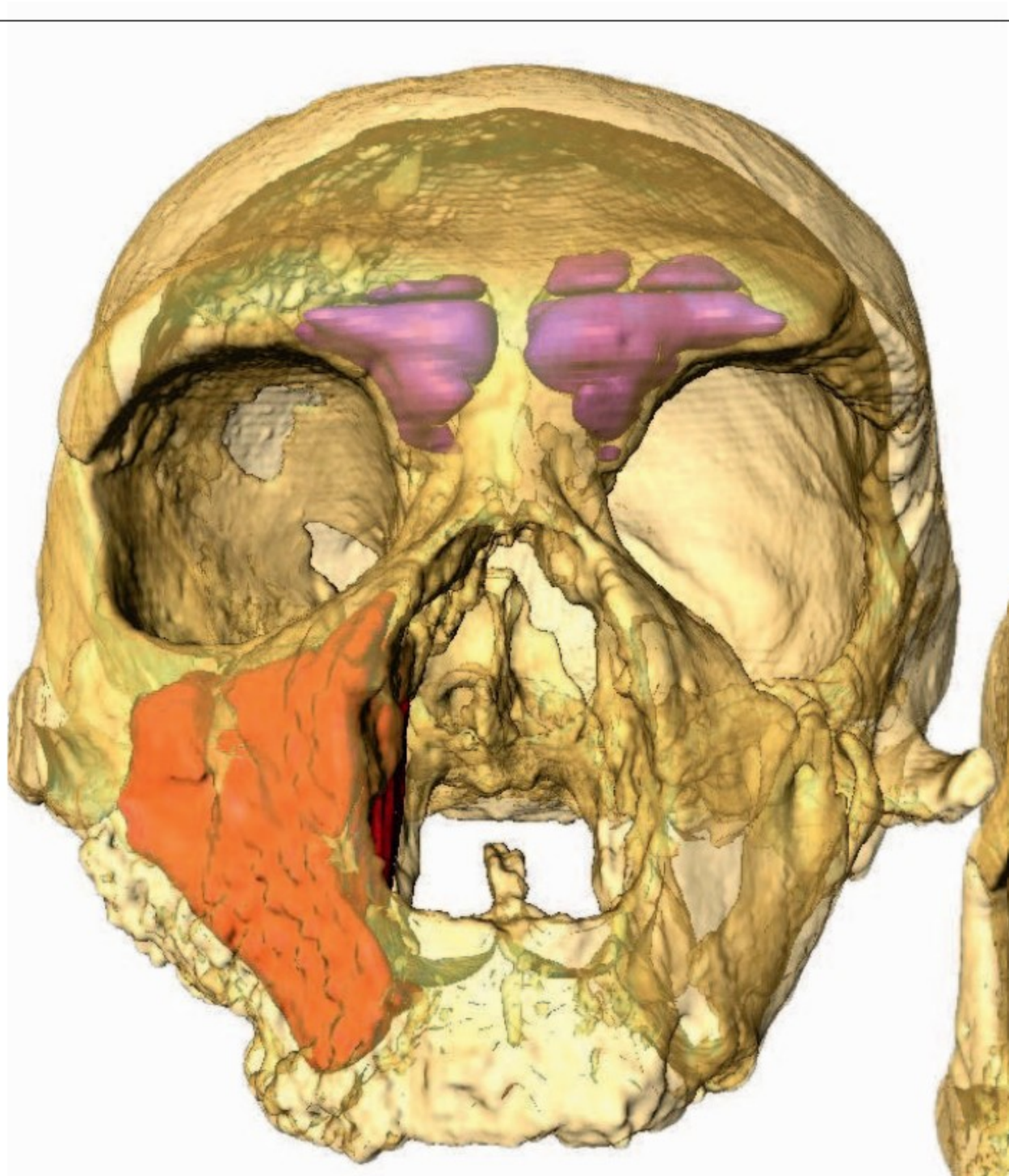
Pourquoi nous ? Pourquoi sommes-nous les seuls du genre *Homo* à avoir échappé à l'extinction, conquérant la Terre entière et lorgnant désormais sur d'autres planètes ? Comment sommes-nous devenus *« une espèce invasive »*, selon la formule du professeur de paléoanthropologie au Collège de France Jean-Jacques Hublin ? Qu'est-ce qui explique notre succès évolutif ? *« Près de 7000 générations nous séparent des premiers* Homo sapiens, estime Laure Ségurel, chargée de recherche au Muséum national d'histoire naturelle (UMR 7206, Éco-anthropologie), à Paris. *Mais la paléoanthropologie, l'archéologie et récemment la génétique permettent de les suivre à la trace et de démasquer en creux leurs qualités, notamment un sens aigu de l'échange et une capacité d'adaptation hors du commun.* » Favorisé notamment par son cerveau, *H. sapiens* a développé dès la préhistoire, et plus largement par la suite, des qualités déterminantes. Attention, ces atouts ne lui sont pas exclusifs, d'autres ont pu les partager, comme ses ancêtres *Homo erectus* ou ses quatre cousins, tous éteints aujourd'hui *(lire p 78)*. Il ne s'agit donc pas ici de comparer, ni d'encenser un vainqueur, mais de cerner, en partie du moins, ce qui a favorisé son parcours hors norme.

1 Un gros cerveau bien câblé et une longue enfance

Neandertal avait un plus gros cerveau qu'*H. sapiens*. Mais contrairement à ce que l'on pensait au début du XX^e^ siècle, la taille n'a pas tout à voir avec les capacités de l'un ou de l'autre de ces hominines *(lire le repère p. 72)*. Antoine Balzeau, paléoanthropologue au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, a d'ailleurs montré en 2011 que notre cerveau s'était recroquevillé depuis 30 000 ans (*grosso modo* l'âge de Cro-Magnon). Toutefois, si néandertaliens et humains anatomiquement modernes ont tous deux une boîte crânienne allongée au moment de la naissance, seuls les seconds acquièrent une forme de crâne plus globulaire durant la première année de leur vie, a montré dès 2010 l'Institut Max-Planck d'anthropologie évolutive à Leipzig (Allemagne). *« Durant les premiers moments de sa vie,* H. sapiens *développe un "câblage" neuronal qui lui confère de grandes capacités cognitives, avec une grande incidence sur notre comportement, nos modes de communication, etc. »*, estime alors le chercheur Philipp Gunz. Chez l'enfant, les circuits neuronaux, peu nombreux à la naissance, se complexifient à la période postnatale. *« Neandertal, qui ne partage pas ce mode de développement, ne percevait vraisemblablement pas le monde comme nous le faisons »*, analyse Jean-Jacques Hublin. Ce qui ne signifie pas qu'il était moins adapté à son environnement. Le développement d'*H. sapiens* est lié aux changements dans deux parties

REPÈRE

LE PALÉOLITHIQUE — ou âge de pierre — commence avec l'apparition des premiers outils lithiques, taillés par des australopithèques il y a 3,3 millions d'années en Afrique. Il s'achève 10 000 ans avant le présent. Quant à la préhistoire, elle prend fin 3300 ans avant J.-C. en Mésopotamie avec l'apparition de l'écriture, même si la question reste controversée. Le paléolithique supérieur (environ 45 000 à 10 000 ans avant le présent), connu pour ses grottes ornées de Chauvet, Cosquer, Niaux et Lascaux, est une période charnière de l'évolution humaine qui a vu l'arrivée de *Sapiens* en Eurasie.



Neandertal

Un cerveau ovale de 1500 à 1750 cm³. La croissance du cerveau néandertalien étant linéaire, son câblage synaptique aurait été plus simple.

Sapiens

Un cerveau rond de 1350 cm³. La croissance cérébrale connaît une phase supplémentaire de « globularisation » où le cerveau acquiert une forme ronde. Son câblage est complexe.

TODD RAE/ ROEHAMPTON UNIVERSITY

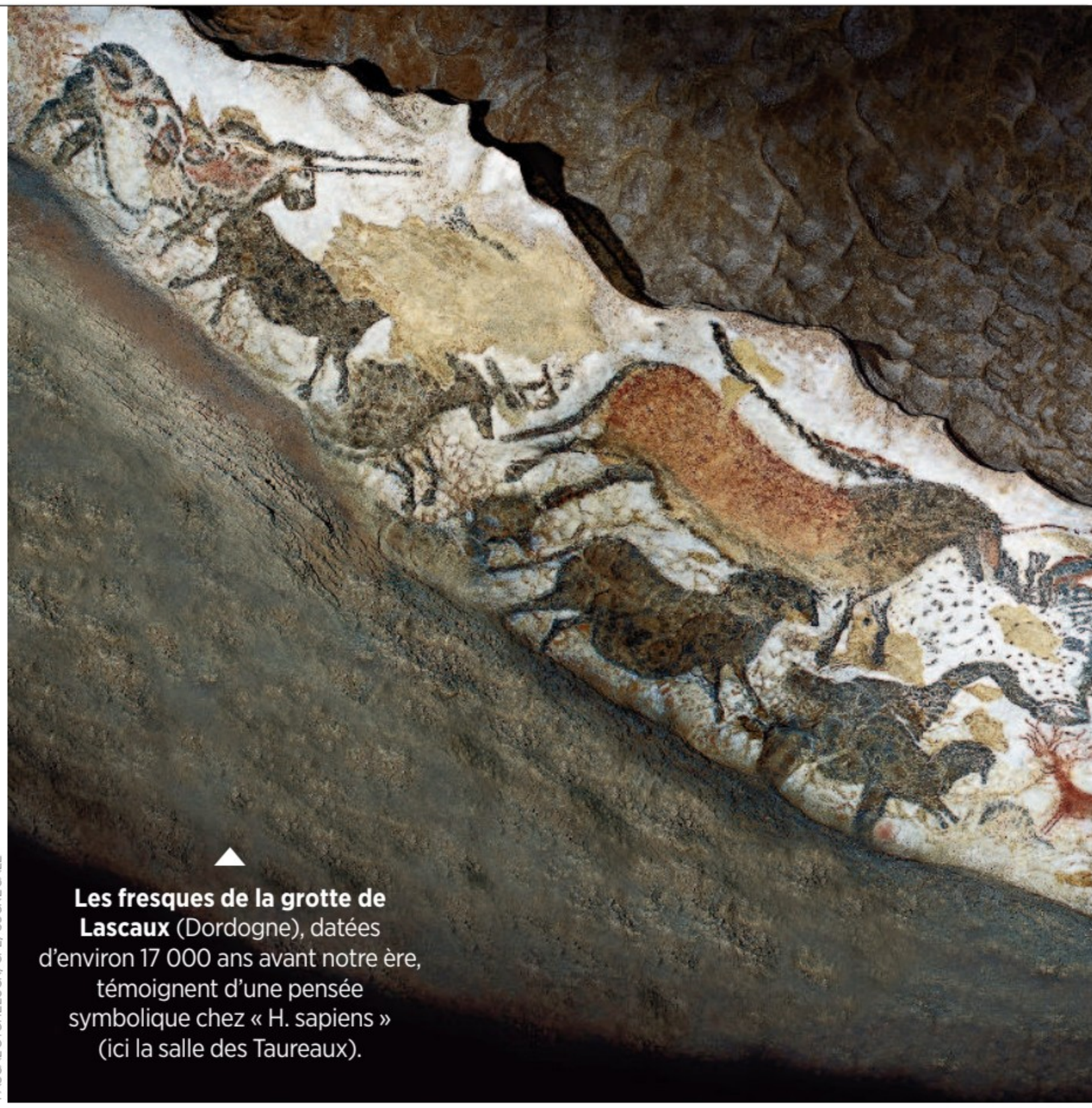
cérébrales, a précisé, en 2018, Simon Neubauer de l'institut Max-Planck de Leipzig : *« Les zones pariétales sont impliquées dans l'orientation, l'attention, la perception des* stimuli*, les transformations sensorimotrices, l'intégration visuospatiale, l'imagerie, la conscience de soi, le travail et la mémoire à long terme, le traitement numérique et l'utilisation des outils.* » Le cervelet, lui, qui se développe beaucoup plus vite que n'importe quelle partie du cerveau, est associé *« à des fonctions liées à la motricité comme la coordination et l'équilibre, mais au traitement spatial et social, ou à celui des tâches* ». Les changements à long terme des formes cérébrales seraient parallèles à l'émergence d'un comportement « moderne » observé dans les archives archéologiques. Cette réorganisation du cerveau et ses conséquences sur le comportement auraient au moins duré jusqu'à il y a 55 000 à 50 000 ans, lorsque les humains modernes ont atteint l'Australie et ont commencé leur dispersion à travers l'Asie continentale. Combiné avec une enfance plus longue, ce réarrangement cérébral *« a permis aux jeunes de développer leur imagination, leur ingéniosité et leur inventivité,* écrit Linda Hurcombe dans un article de 2024 consacré aux secrets de la réussite des *Homo sapiens. Une fois adultes, ils ont payé des "dividendes" à leur société, par exemple, pour coloniser de nouveaux habitats, développer de nouvelles stratégies de*

MAX-PLANCK-INSTITUTE

« Durant les premiers moments de sa vie, Sapiens développe un "câblage" neuronal qui lui confère de grandes capacités cognitives »

Philipp Gunz, paléoanthropologue à l'Institut d'anthropologie évolutive Max-Planck de Leipzig, en Allemagne

chasse ou s'occuper de nourrissons et de jeunes mères. »
Une telle maturation et socialisation a inévitablement contribué au développement cognitif de l'espèce et à celui du langage. Rien ne s'opposait à l'usage de la parole chez les néandertaliens. Ils auraient notamment eu la capacité de prononcer les voyelles « a », « i » et « ou », ce qui revient à dire qu'ils auraient pu prononcer autant de voyelles que nous. Toutefois, un basculement semble s'être opéré avec *H. sapiens*, selon différents travaux. *« Le langage de l'homme moderne se distingue de tous les autres modes de communication par le phénomène de la double articulation, c'est-à-dire l'organisation de consonnes et de voyelles qui n'ont pas de signification en elles-mêmes mais permettent de créer un nombre illimité de mots et de phrases porteurs de sens »*, estime Philippe Mennecier, éco-anthropologue au CNRS, spécialiste de la diversité et de l'évolution culturelles. Ce sont ses capacités cognitives et sa socialisation qui lui ont permis de développer ce langage doublement articulé.



PASCAL GTGHELUCK/ SPL/ SUCRÉ SALÉ

Les fresques de la grotte de Lascaux (Dordogne), datées d'environ 17 000 ans avant notre ère, témoignent d'une pensée symbolique chez « H. sapiens » (ici la salle des Taureaux).

2 Des capacités d'abstraction

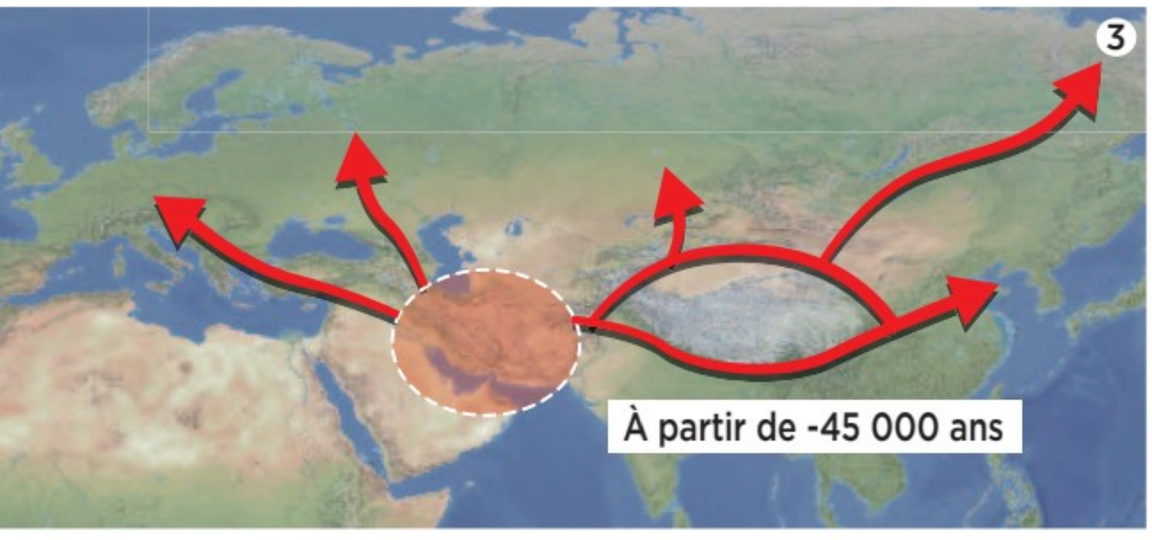
« Pour peindre les lions de Chauvet-Pont d'Arc, il y a 36 000 ans, il fallait une maturité sociale et cognitive certaine », selon la préhistorienne Carole Fritz, responsable du Centre de recherche et d'étude pour l'art préhistorique Émile-Cartailhac, à Toulouse. Des scientifiques accordent à *Homo erectus* et Neandertal la paternité de gravures sur des coquillages, la mise en couleur de perles, des « griffes » gravées sur un rocher et même des peintures, datées de -66 000 ans en Espagne, quoique ce dernier point soit controversé. Mais les productions d'*H. sapiens* sont bien plus spectaculaires, estime la chercheuse. L'art pariétal est le vecteur d'une pensée symbolique. Une façon de consigner des mythes et de les transmettre. Les fresques composent une narration, qui change avec le climat lorsque certaines faunes disparaissent.
Mathilde Salagnon, du Neurocampus de l'université de Bordeaux, a testé l'activité cérébrale de participants face à des versions schématiques des premières gravures paléolithiques, puis des visages ornés avec des perles en bois, des traits de peinture rouge. Elle estime dans sa thèse *« qu'au paléolithique moyen, les bases neurales étaient déjà fonctionnelles pour sélectionner les éléments pertinents de l'environnement afin de reconnaître des productions intentionnelles d'autrui, puis d'être capable d'y attacher une signification »*.

3 Des groupes sanguins très diversifiés

C'est la dernière étude en date à éclairer l'un de nos possibles atouts. Publiée en janvier dans *Scientific reports*, elle montre que peu après leur sortie d'Afrique d'il y a 60 000 ans, les premiers *H. sapiens* d'Eurasie ont acquis une toute nouvelle palette de groupes sanguins. Mieux, ils contrastent forte-

REPÈRE

LA PALÉOGÉNOMIQUE, lancée en 1997 par Svante Pääbo, de l'Institut Max-Planck de Leipzig (Allemagne), prix Nobel de médecine 2022, a permis le recueil des données de 10 000 génomes anciens, confirmant notamment notre échange de gènes avec Neandertal.



BRUNO BOURGEOIS

Après une de ses sorties du continent africain (1), c'est lors d'une longue halte sur le plateau perse, entre - 60 000 et - 45 000 ans (2), qu'« H. sapiens » a connu une véritable floraison de ses groupes sanguins. Avant de conquérir l'Eurasie... (3)

ment avec ceux des néandertaliens et des dénisoviens qu'*H. sapiens* a croisés en progressant vers l'est, il y a environ 45 000 ans. *« Cette diversification se serait produite au Proche-Orient et aurait pu doter* H. sapiens *d'un nouvel arsenal adaptatif »*, résume Stéphane Mazières, chercheur en génétique évolutive à l'université d'Aix-Marseille et premier auteur. Son laboratoire est l'un des premiers au monde à creuser cette mine d'informations. Naturellement, les globules rouges ne sont pas conservés sur les squelettes anciens, mais les fragments osseux ou dentaires peuvent contenir de l'ADN, comme l'a montré la paléogénomique *(lire le repère ci-contre)*. La biologie moléculaire livre ensuite des informations touffues, épineuses, et qui ne peuvent être décortiquées qu'à l'aide de puissants outils informatiques. Ainsi, les groupes sanguins apparaissant comme identiques sont en réalité codés par une grande variété de leur gène. Par exemple, les groupes A, B, AB et O ne proviennent pas de quatre versions du gène ABO, mais de plus de 350 formes de ce gène ! *« Et leur géographie est révélatrice de l'histoire d'*Homo sapiens, poursuit Stéphane Mazières. *La lecture des gènes des groupes sanguins a permis à notre équipe d'affiner l'histoire du peuplement des Amériques ou celui de l'Asie centrale par les nomades des steppes et du légendaire Gengis Khan. Cette fois, nous avons choisi d'analyser les groupes sanguins des néandertaliens et des premiers* H. sapiens, *car quasiment personne ne l'avait fait. »* Les scientifiques ont comparé chaque séquence préhistorique avec la séquence humaine actuelle utilisée comme référence internationale, obtenant des résultats exploitables pour 22 *Homo sapiens* et 14 néandertaliens, vieux de 20 000 à 120 000 ans, provenant d'Europe de l'Ouest, d'Europe centrale, de Sibérie et d'Asie de l'Est.

Résultat : tandis que Neandertal conservait les mêmes groupes sanguins pendant 80 000 ans, *H. sapiens*, lui, connaissait une véritable floraison de ces groupes, entre -60 000 et -45 000 ans. ▶

MARTIN MEISSNER/AP/SIPA

Où cela ? *« Sur le plateau perse, une région d'incubation des cultures archéologiques et des lignées génétiques des premiers* Homo sapiens », montrent les travaux parus en 2022 de Leonardo Vallini, de l'université de Padoue (Italie). C'est lors de cette longue halte, il y a entre 60 000 et 45 000 ans, avant de conquérir l'Eurasie, que les pionniers venus d'Afrique auraient vu leurs groupes sanguins exploser en diversité. Notons que certains des nouveaux groupes sanguins — notamment un groupe O particulier et certains rhésus — sont absents d'Afrique, preuve qu'ils sont apparus hors du continent noir. Quel pouvait en être l'intérêt pour les nouveaux venus ? *« Certains groupes sanguins confèrent un avantage aux pathogènes comme le choléra, le paludisme, l'un des virus de la gastro-entérite et même le Covid »*, selon Laura Cooling, de l'université du Michigan (États-Unis). Mais quels sont les pathogènes qui sévissaient à l'époque de la floraison d'*Homo sapiens* et auraient pu lui donner un avantage immédiat ? Il reste à le déterminer, admet Stéphane Mazières. Toutefois, cette diversité lui aura peut-être permis de résister à des maladies survenues plus tard. Le chercheur et son équipe s'attellent désormais aux marqueurs génétiques impliqués dans les réponses immunitaires. Un travail aussi colossal que délicat.

4 Une fécondité hors pair

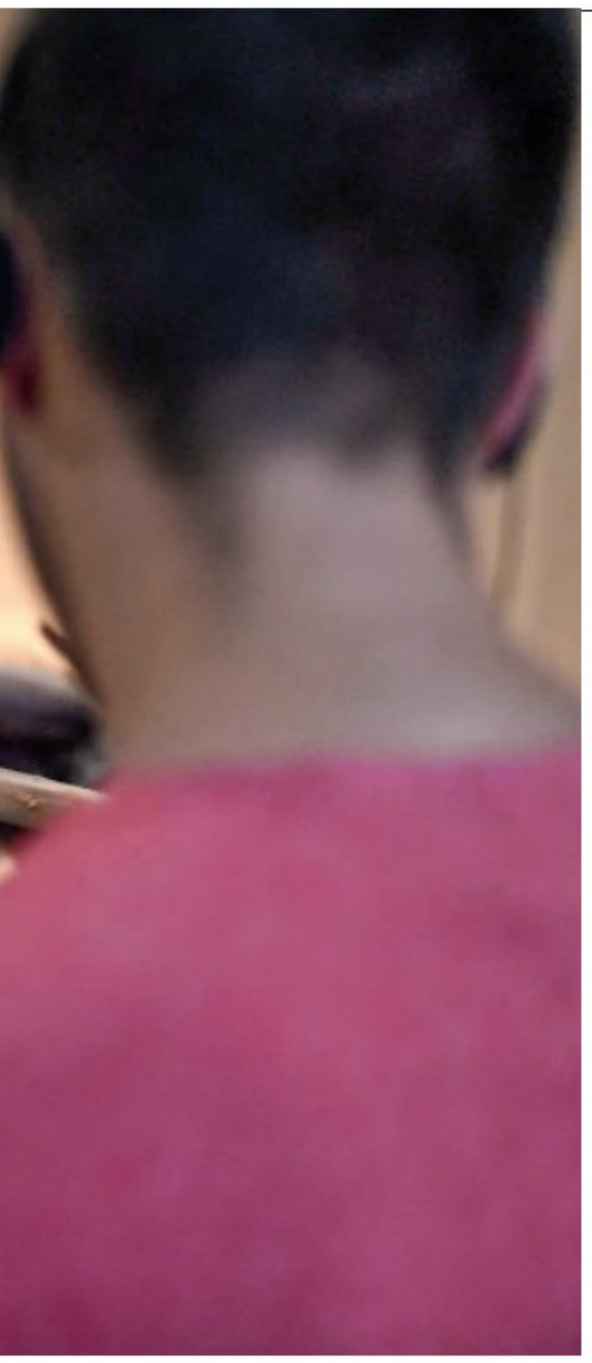
« Notre espèce a connu un succès reproductif sans précédent dans l'histoire des humains », estime Jean-Jacques Hublin. Non sans conséquences. *« Au cours des derniers 50 000 ans, la biomasse des mammifères sauvages aurait été divisée par sept du fait de la prédation humaine, du développement de l'agriculture et de la destruction des milieux naturels »*, assène encore celui qui a intitulé sa leçon inaugurale au Collège de France en 2022 « *Homo sapiens*, une espèce invasive ».

Mais que savons-nous de notre démographie, de 120 000 à 60 000 ans avant notre ère ? Bien peu de choses. *« L'humanité a commencé avec une population peu nombreuse. Sa population serait ensuite restée de faible taille durant une longue période : entre 5000 et 20 000 individus selon les estimations »*, considérait Mathias Currat, du département de génétique et évolution de l'université de Genève (Suisse), dans notre hors-série de 2015 « La grande histoire de l'humanité en 50 questions ». Comment ces chiffres ont-ils été obtenus ? *« Ils viennent d'estimations de la "taille efficace" de la population humaine,* précise-t-il aujourd'hui. *Soit le nombre d'individus d'une population théorique stable dans le temps, qui correspond à la diversité génétique observée. Il s'agit d'un concept théorique, mais la taille minimum de la population humaine devrait s'en approcher. »* C'est notre expansion géographique et démographique forte et rapide, commencée il y a environ 60 000 ans, qui explique la faible diversité génétique de notre espèce, avance Mathias Currat. Seuls de petits groupes de migrants, porteurs d'un patrimoine génétique limité, ont en effet donné naissance à l'ensemble des populations humaines qui allaient coloniser le reste de la planète.

En 2011, Paul Mellars et Jennifer French, de l'université de Cambridge (Royaume-Uni), s'appuyant sur des données archéologiques, ont suggéré que cette propension démographique existait déjà lorsque les hommes modernes ont remplacé les néandertaliens d'Eurasie, entre 40 000 et 30 000 ans avant notre ère : durant

GRANDPALAISRMN (MUSÉE D'ARCHÉOLOGIE NATIONALE) / JEAN-GILLES BERIZZI

Statuette de vénus dite le losange, en stéatite, mise au jour dans les grottes de Grimaldi (Italie) et datée d'environ -25 000 ans. Ses formes pourraient symboliser la fécondité.



QUALITÉS PHYSIQUES

Un coureur de fond

De son ancêtre *Homo erectus* (ou encore *Homo ergaster*, l'*Homo erectus* africain, *reconstitution ci-contre*), *Homo sapiens* a hérité de fémurs et tibias allongés et d'une belle aptitude au marathon. Comme lui, c'est un bipède accompli, capable de marcher et surtout de courir sur de longues distances, à l'instar des guerriers masaï. Ayant perdu sa pilosité et acquis la capacité de transpirer, il peut évacuer efficacement la chaleur produite par ses contractions musculaires, ce qui le rend apte à se déplacer plus vite et plus longtemps. Toutes ces qualités physiques ont fait des premiers humains modernes d'excellents chasseurs. Informés par les vautours, qui tournoient au loin, de la présence d'une proie morte, ils arrivent avant les autres charognards. Très endurants, ils finissent par épuiser les proies qu'ils poursuivent, qui, elles, n'arrivent pas à haleter pour se refroidir dans leur course. Infatigables marcheurs, ils peuvent échapper aux aléas climatiques et partir pour de longues migrations.

cette période, la population d'humains modernes du sud-ouest de la France a été multipliée par au moins dix. La transition entre néandertaliens et humains modernes aurait aussi été une transition démographique !

Qu'en dit la génétique ? *« À partir d'un ancêtre commun, les données permettent de voir des* baby-booms, *des chutes démographiques ou des poussées de croissance chez des espèces,* explique Évelyne Heyer, du Musée national d'histoire naturelle *(lire l'entretien p. 82). C'est ainsi qu'on observe que le déclin de Neandertal est antérieur à l'arrivée des* H. sapiens, *ou encore que nos ancêtres ont connu une augmentation de population avant même leur sédentarisation. En revanche, si nous observons des tendances, nous ne pouvons pas les chiffrer. »* À quel point cette fécondité a-t-elle facilité notre expansion ? *« Les femmes du paléolithique pouvaient procréer jusqu'à environ 30 ans, la durée de l'allaitement était de deux à trois ans,* résume Jean-Jacques Hublin. *Avec un premier enfant autour de 14 ans, cela donne cinq ou six naissances au maximum par femme. »* Linda Hurcombe et Robin Dennell, de l'université d'Exeter (Royaume-Uni), ajoutent dans un article de 2024 que *« l'augmentation du taux de reproduction s'est accompagnée du développement d'un cerveau plus rond, mais aussi d'une enfance beaucoup plus longue que chez les autres primates* [lire p. 66] ». Conséquence : *« Les humains auraient été incapables d'élever leur progéniture sans l'aide d'alloparents* »,* estime Sarah Blaffer Hrdy, auteure du livre *Mothers and Others,* qui a observé ce partage des tâches chez les chasseurs-cueilleurs africains tels les Kung (au nord de l'Afrique australe) ou les Hadza (Afrique de l'Est). *« Quelque part en Afrique, il y a plus d'un million d'années, une lignée de singes a commencé à élever ses petits différemment de leurs ancêtres les grands singes »,* estime-t-elle. Pour survivre dans un monde où la nourriture est rare, les plus jeunes, incapables de se débrouiller seuls, avaient besoin de tout un village pour les élever. *« C'est de cette éducation que naît la capacité humaine à comprendre autrui,* soutient Sarah Blaffer Hrdy. *Les mères et autres apprennent qui se soucie des autres et qui ne s'en soucie pas. »*

* Terme anthropologique qui désigne la parenté pouvant assurer le rôle de mère : soit le père, les grands-parents, tantes ou frères et sœurs plus âgés, ainsi que les aides sans lien génétique.

5 Un champion du réseautage social

« L'évolution de l'humain a quelque chose de spécifique : il transmet aussi de la culture et cela influe la répartition génétique », estime Évelyne Heyer. *« C'est la coopération entre individus non apparentés qui a été décisive. Elle a permis aux populations de s'adapter en réponse aux fluctuations climatiques et environnementales locales, et de supplanter et de remplacer d'autres espèces d'hominines »,* selon les paléontologues Brian Stewart, de l'université du Michigan et Patrick Roberts, de l'Institut Max-Planck de Leipzig. Le partage de connaissances (y compris géographiques), le troc de biens et de denrées entre populations distantes, la communication rituelle et symbolique, l'échange de femmes (selon la thèse de l'anthropologue Françoise Héritier, aujourd'hui confirmée par l'ADN) auraient contribué au succès d'*H. sapiens,* qui n'a cessé de se déplacer et d'agrandir ses cercles hors du cocon familial.

JULIEN FAURE/LEEXTRA

« Notre espèce a connu un succès reproductif sans précédent dans l'histoire des humains »

Jean-Jacques Hublin, titulaire de la chaire de paléoanthropologie au Collège de France

Les humains modernes seraient devenus des « champions des réseaux sociaux » à grande échelle, insufflant, échangeant de nouvelles idées et techniques. De bouche à oreille, celles-ci se seraient répandues encore plus vite que les populations. *« L'une de nos particularités est celle d'être sans doute les premiers à étudier, à documenter, à chercher à comprendre tout ce qui nous entoure, mais aussi à partager et enregistrer les informations, puis à les réutiliser en innovant »*, explique le paléoanthropologue Antoine Balzeau. C'est ce qu'on appelle la culture cumulative. *« Notre impression d'avoir autant de capacités est surtout liée à notre héritage »*, souligne encore le chercheur. *« Écriture, imprimerie, Internet, mails… sont autant d'étapes qui nous ont permis de constituer une base de connaissances toujours plus grande. Chacun d'entre nous n'est pas devenu plus malin, nous profitons du savoir de nos prédécesseurs et de nos contemporains. »*

ANTOIE BALZEAU

« L'une de nos particularités est celle d'être sans doute les premiers à étudier, à chercher à comprendre tout ce qui nous entoure »

Antoine Balzeau, paléoanthropologue au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris

6 Une curiosité illimitée

Les migrants du paléolithique n'ont certainement pas eu conscience d'habiter un continent et d'en sortir. Il y a 300 000 ans, les premiers *H. sapiens* fréquentaient le « Sahara vert » d'Afrique du Nord, comme le montre le fossile de Jebel Irhoud, au Maroc, qui a fait reculer de 100 000 ans la date de l'apparition de notre espèce. Les chasseurs-cueilleurs ont suivi des couloirs, se sont déplacés au gré des variations climatiques, en pistant le gibier, et en s'éloignant de leurs contrées d'origine. *« En dehors de ces nécessités vitales, la curiosité, une qualité particulièrement humaine, nous a toujours poussés à dépasser nos horizons, à voir ce qu'il y avait derrière la colline »*, avance Évelyne Heyer. *« Notre espèce a développé une nouvelle niche écologique, celle du "spécialiste généraliste"*, précise Brian Stewart, de l'université du Michigan. *Non seulement elle a occupé et utilisé une diversité d'environnements, mais elle s'est également spécialisée dans son adaptation à certains de ces extrêmes environnementaux* [lire ci-contre] ». Bien sûr, les humains modernes ont chaque fois développé des techniques pour s'acclimater. Leur comportement de grand prédateur a même pu les presser d'innover. Si les chasseurs du paléolithique supérieur ont développé de nouvelles armes légères et à longue portée — tels les arcs —, c'est parce qu'après avoir décimé la majorité des gros mammifères, il leur a bien fallu imaginer de nouveaux outils pour tuer un gibier plus petit et rapide, estiment ainsi les archéologues Miki Ben-Dor et Ran Barkai, de l'université de Tel-Aviv (Israël). Bref, notre inclination à la destruction serait aussi un moteur de notre évolution. Jusqu'à quand ?

7 Un goût pour la migration et les métissages

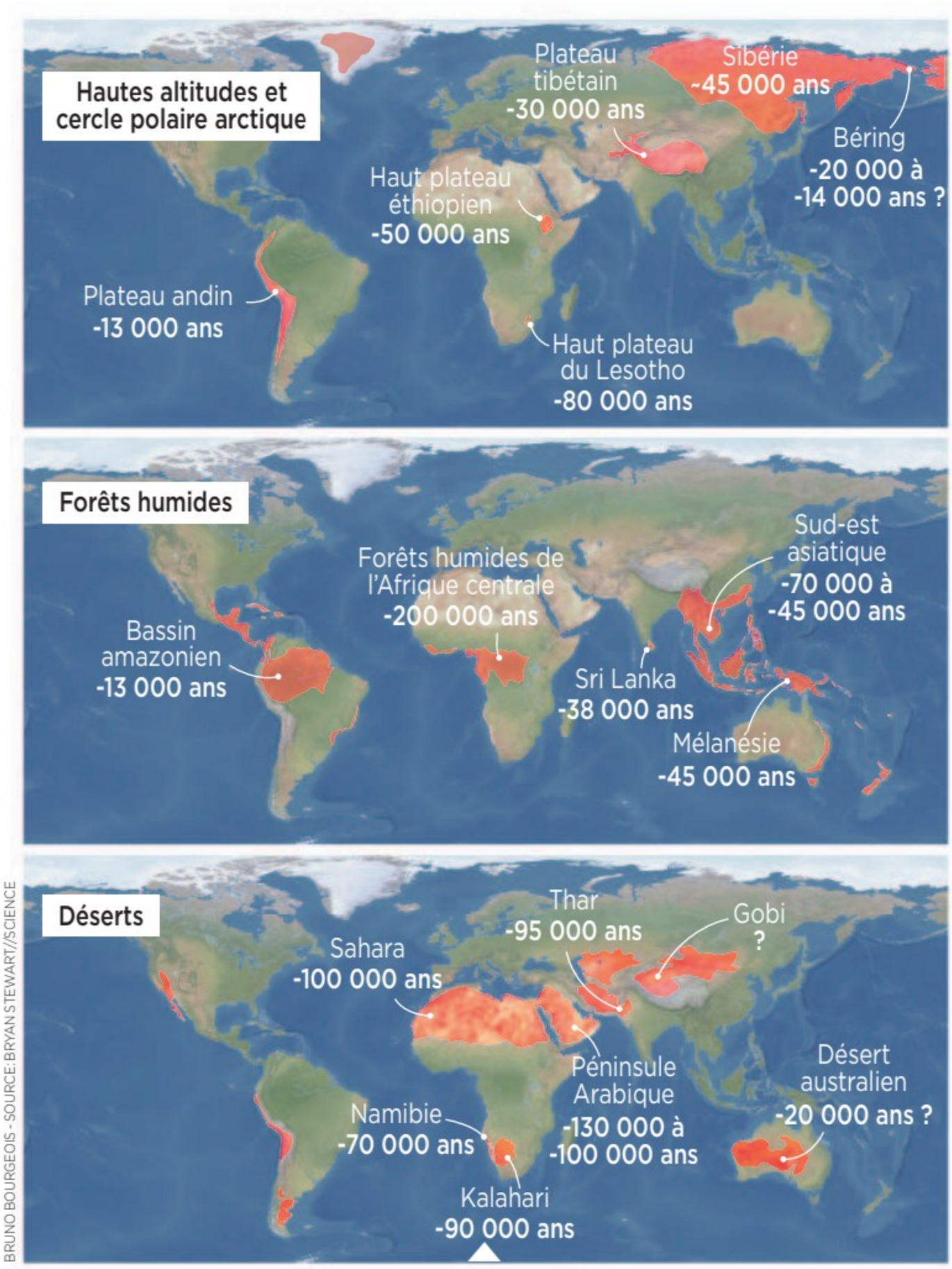
« Neandertal ne se mélangeait pas et c'est peut-être ce qui l'a perdu », estime Ludovic Slimak, archéologue, chercheur CNRS à l'université de Toulouse III – Paul-Sabatier, après la découverte d'une nouvelle lignée de néandertaliens jusqu'alors inconnue dans la grotte de Mandrin (Drôme). Elle aurait vécu isolée durant 50 000 ans, alors que des voisins vivaient à deux semaines de marche. Un isolement inimaginable chez son cousin *H. sapiens*, d'autant que la vallée du Rhône est, à l'époque, un des grands couloirs migratoires entre le nord de l'Europe et la Méditerranée. *« En vous mêlant aux autres, vous accroissez la variation génétique dont vous disposez, et avez plus de capacités à vous adapter aux changements climatiques et aux agents pathogènes »*, estime Tharsika Vimala, généticienne des populations à l'université de Copenhague (Danemark). On sait aujourd'hui que Neandertal, Denisova et *H. sapiens* ont échangé des gènes. Ces legs ont pu être utiles ou néfastes. Selon la chercheuse, *« on peut sans aucun doute affirmer que l'un des principaux atouts des premiers hommes modernes résidait dans leur capacité à migrer à travers le monde »*. Sans ces épopées et ces rencontres, l'humanité n'aurait pas le même visage aujourd'hui. Ni même une telle maturation sociale. ■ **R. F.**

REPÈRE

POUR DISTINGUER LES DIFFÉRENTS PRIMATES, contemporains ou disparus, les paléontologues utilisent désormais les taxons suivants. Les hominines rassemblent les membres du genre *Homo* et leurs ancêtres ou parents fossiles (Toumaï, Orrorin, australopithèques, kenyanthropes et ardipithèques). Les hominidés désignent, le plus souvent, l'humain actuel et ses parents grands singes, chimpanzés, bonobos, gorilles, orangs-outangs. Pour certains, il est même réservé aux seuls humains actuels et aux gorilles. Les hominoïdes, eux, forment une super-famille de primates arboricoles ou terrestres comprenant les grands singes africains et asiatiques, l'humain et leurs ancêtres fossiles.

Une force d'adaptation aux conditions extrêmes

La capacité de Sapiens à s'acclimater à des environnements hostiles lui a permis d'adopter des modes de vie très variés et ainsi de devenir le dernier hominine vivant sur Terre.



BRUNO BOURGEOIS - SOURCE: BRYAN STEWART//SCIENCE

Estimations des dates auxquelles les « H. sapiens » se sont installés dans des régions du globe, aux environnements diversifiés parfois extrêmes.

« *Une plasticité écologique unique, propre à* H. sapiens, *lui a permis de coloniser chaque recoin de la planète, jusqu'aux plus hostiles* », estiment les paléontologues Brian Stewart, de l'université du Michigan (États-Unis) et Patrick Roberts, de l'Institut Max-Planck de Leipzig (Allemagne). « *Non seulement notre espèce a occupé et utilisé une diversité d'environnements, mais elle s'est également spécialisée dans son adaptation à certains de ces extrêmes environnementaux,* précisent-ils. *Comprendre cette niche écologique offre un cadre pour discuter de ce que signifie être humain et comment notre espèce est devenue le dernier hominine survivant sur la planète.* » Notre flexibilité nous a permis d'adopter des modes de vie très variés, même si la mondialisation et l'interconnexion gomment aujourd'hui cette diversité.

Les innovations technologiques ont joué un rôle majeur

L'humain a conquis ces environnements en grande partie grâce à des innovations technologiques telles que le feu, les vêtements, les habitations, les progrès dans les équipements et les pratiques de chasse, les méthodes de stockage de la nourriture et de l'eau, et la connaissance accrue des repères dans le temps et l'espace. Ces acclimatations l'ont modifié en retour, ajoutent Melissa Ilardo, de l'université de l'Utah (États-Unis) et Rasmus Nielsen, de l'université de Copenhague (Danemark), spécialistes de la biologie intégrative et des statistiques, dans une étude de 2018. Les scientifiques ont en effet trouvé des variations physiologiques et génétiques* marquantes chez les habitants de l'Arctique, des hautes altitudes comme le Tibet, ou encore chez les plongeurs en apnée d'Asie du Sud-Est. Avec le changement climatique en cours, on se demande comment et à quelle vitesse les *Homo sapiens* s'adapteront aux extrêmes à venir. ■ **R. F.**

* Changements de phénotypes héréditaires induits par la sélection naturelle.

Les multiples sorties d'Afrique de Sapiens

Pour gagner la surface de la Terre, notre ancêtre a d'abord dû s'aventurer hors de son berceau : l'Afrique. Ce voyage, loin d'être une conquête intentionnelle, s'est produit par vagues, sur des centaines de générations et des dizaines de milliers d'années, au gré d'allers, de retours et de colonisations infructueuses.

BRUNO BOURGEOIS

La dispersion d'« Homo sapiens » vers les autres continents s'est déroulée par vagues successives. Des groupes d'humains colonisent d'abord l'Eurasie et l'Océanie, avant de rejoindre les Amériques par le détroit de Béring, à la faveur de la baisse du niveau des océans.

Pendant des centaines de milliers d'années, *H. sapiens* a arpenté le continent africain qui l'a vu naître. Suivre sa trace n'a pas été simple pour les spécialistes tant les fossiles étaient rares. Mais en 2017, stupeur : Jean-Jacques Hublin, alors à l'Institut Max-Planck d'anthropologie évolutionniste (Allemagne), et Abdelouahed Ben-Ncer, de l'Institut national des sciences de l'archéologie et du patrimoine (Maroc), dévoilent des fragments de crâne et une mandibule presque entière découverts sur le site de Jebel Irhoud, au Maroc. Ceux-ci, datés d'environ -300 000 ans, repoussent d'au moins 100 000 ans l'apparition de notre espèce ! Jusqu'à cette trouvaille, on ne disposait que des trois crânes de Herto (Éthiopie), vieux de 157 000 ans, et des vestiges de l'homme de Kibish (Éthiopie, toujours), redatés récemment à -233 000 ans.

Douée d'une grande plasticité *(lire p. 66)*, notre espèce *H. sapiens* occupait déjà des environnements très différents il y a 150 000 à 300 000 ans : des savanes arborées, des plaines herbeuses et bientôt des forêts tropicales, notamment celles d'Afrique de l'Ouest, comme le montrent les outils trouvés sur le site de Bété, en Côte d'Ivoire. Or, comme l'histoire l'a montré, *H. sapiens* ne s'arrêtera pas là. Ce nomade ne cesse de se déplacer ; il voyage, explore et, sans vraiment le savoir, finira par quitter son berceau dans une longue marche étalée sur des milliers de générations et des dizaines de millénaires, qui l'emmènera partout sur la planète Terre.

Le renfort de la paléogénétique et l'apport de nouveaux fossiles

À partir des années 1980 et la confirmation par les analyses génétiques de son origine africaine, les paléoanthropologues se sont figuré que l'humain moderne était sorti d'Afrique lors d'un seul grand mouvement migratoire, il y a environ 60 000 ans. À l'origine d'une telle pensée : un panel longtemps limité de vestiges archéologiques — outils, ossements — découverts hors d'Afrique et tous postérieurs à cette hypothétique date butoir d'il y a 60 000 ans. Or, les registres fossiles s'étoffent un peu plus chaque année et depuis les années 2010, avec le renfort de la paléogénétique — l'étude de l'ADN ancien —, ils montrent que l'histoire de la dispersion humaine vers les autres continents a été un phénomène beaucoup plus complexe et touffu, qui s'est très certainement produit par vagues successives. *« Pour essayer de mieux comprendre cette longue épopée, il faut déconstruire le mythe d'une migration intentionnelle et directionnelle,* explique Antoine Balzeau, paléoanthropologue au Muséum national d'histoire naturelle (MNHN), à Paris. *Les humains se déplacent alors en petits groupes, à l'échelle de leur vie, dans un sens, puis dans l'autre, et sans se mettre en grande difficulté.* »

NATIONAL PARK SERVICE/U.S. GEOLOGICAL SURVEY/BOURNEMOUTH UNIVERSITY, U.K.

Datées d'environ -23 000 ans, ces empreintes humaines fossilisées mises au jour au Nouveau-Mexique (États-Unis) attestent de la présence d'« H. sapiens » bien avant la fin du dernier âge de glace.

Aujourd'hui, les paléoanthropologues estiment qu'*Homo sapiens* a pu faire ses premiers pas hors d'Afrique il y a entre 194 000 et 177 000 ans, une date obtenue à partir de l'âge d'un os de mâchoire exhumé dans la grotte de Misliya, sur le mont Carmel, en actuel Israël — le plus vieux vestige d'*H. sapiens* découvert à ce jour hors de ses terres natales. Une autre succession de vagues a pu se produire il y a entre 120 000 et 90 000 ans, à une époque particulièrement propice. *« Il est important de se figurer le climat et l'environnement de l'époque pour comprendre comment ceux-ci ont pu influencer les mouvements humains »*, souligne Sandrine Prat, paléoanthropologue du CNRS au MNHN.

Des vagues de dispersion infructueuses sur le long terme

Or, à cette période, l'Afrique du Nord et la péninsule Arabique sont plus humides et verdoyantes qu'aujourd'hui ; les savanes arborées, veinées de lacs et de rivières, supplantent les déserts arides et offrent un terrain bien plus accueillant pour une espèce humaine en mouvement. Des sépultures découvertes en actuel Israël, dans la grotte de Skhul, également sur le mont Carmel, et dans la grotte de Qafzeh, sur le mont du Précipice, attestent d'une autre occupation de cette région par *Homo sapiens* il y a environ 100 000 ans. La présence de ces fossiles est évocatrice, car le couloir levantin, en dépit d'un niveau de la mer bien plus bas à l'époque que celui que l'on connaît de nos jours, semble être le seul passage terrestre permettant à des humains de quitter l'Afrique vers les autres continents. En 2011, pourtant, des outils découverts à l'extrême sud-ouest de la péninsule Arabique, datés de -125 000 à -106 000 ans, esquissent les contours d'une autre théorie. Comme les outils sont très similaires à ceux retrouvés de l'autre côté du détroit de Bab-el-Mandeb, en Éthiopie, certains chercheurs émettent l'hypothèse qu'*H. sapiens* a pu traverser la mer Rouge à une époque où celle-ci était moins profonde, et le détroit plus navigable. *« La région manque de sites archéologiques pour appuyer cette théorie,* estime toutefois Sandrine Prat. *La densité en vestiges archéologiques du couloir levantin laisse plutôt supposer que les humains ont emprunté cette voie avant de longer les côtes de la mer Rouge vers le sud de la péninsule Arabique.* »

Mais ces premières sorties d'Afrique ne se sont sûrement pas cantonnées à l'intersection des continents. Selon une étude de 2017 menée par Michael Petraglia, à l'époque chercheur à l'institut Max-Planck de géoanthropologie, en Allemagne, des groupes de chasseurs-cueilleurs auraient cheminé en longeant les côtes de l'Inde et jusqu'en Asie du Sud-Est. Des molaires et un fragment de mâchoire découverts dans la grotte de Zhiren, près de Chongzuo en Chine, et datés de -116 000 à -106 000 ans, témoigneraient en effet d'une présence d'*Homo sapiens* dans cette région et à cette époque. Ces vagues de dispersion tôtives ont néanmoins été relativement

OCCUPATION

Cro-Magnon, un Sapiens bien français

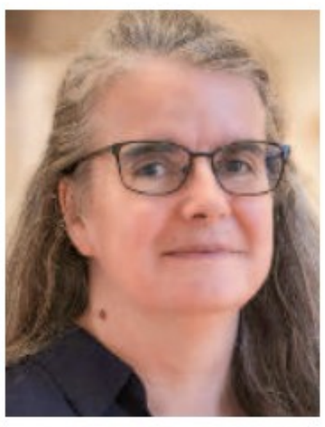
C'est en France que l'on trouve trace de la première incursion d'*H. sapiens* en Europe. Une dent d'enfant, découverte en 2023 dans la grotte de Mandrin (Drôme) et datée de -54 000 ans, a fait reculer la présence de *sapiens* sur le continent européen de 9000 ans avant leur occupation plus à l'est dans le site de Bacho Kiro, en Bulgarie. Le petit humain vivait dans une société d'archers, une technologie dont on pensait qu'elle n'apparaissait que 40 000 ans plus tard dans la région. La France a été puissamment marquée par ces chasseurs-cueilleurs et artistes, comme en témoigne la grotte Chauvet, occupée il y a 37 000 à 28 000 ans. Quant à l'homme de Cro-Magnon, découvert en 1868 sur le site de Dordogne qui lui a donné son nom, il est devenu dans l'imaginaire commun synonyme d'homme préhistorique.

infructueuses sur le long terme : les chasseurs-cueilleurs échouant à s'implanter durablement. « *Le peuplement de l'Eurasie est loin d'avoir été un processus linéaire et continu,* note Sandrine Prat. *Il y a eu des phases de colonisation des territoires, entrecoupées d'extinctions locales, de remplacements et d'impasses évolutives.* »

Des rencontres avec d'autres humanités

Survient alors une énième vague — il est impossible de les dénombrer précisément — il y a entre 70 000 et 50 000 ans. Elle essaimera à travers le monde la majorité des populations desquelles nous descendons. Cette fois encore, les paléoanthropologues supposent que nombre de ces groupes se seraient déplacés vers l'est, le long des côtes de la péninsule Arabique, puis de l'Inde et vers l'Asie du Sud-Est. L'un des témoignages de cette vague est la découverte de fossiles d'*H. sapiens*, datés d'environ -42 000 ans, dans la grotte de Tianyuan, près de Pékin (Chine). Des chasseurs-cueilleurs se sont aussi sans doute engagés à travers l'Océanie, probablement par les îles Raja Ampat et la Nouvelle-Guinée, jusqu'en Australie, qu'ils ont atteinte il y a au moins 55 000 ans, tandis que d'autres s'aventuraient jusqu'aux Amériques il y a au moins 30 000 ans. Enfin, des groupes se sont déplacés vers le nord, le long d'axes plus continentaux qui les ont amenés très progressivement à occuper des territoires en Asie centrale, puis vers l'ouest, en Europe.

Tout au long de ces voyages, *H. sapiens* fait la rencontre d'autres humanités, avec lesquelles il se métisse. En Asie, il croise la route des dénisoviens, dont les traces génétiques se détectent encore dans 0,1 à 3 % de l'ADN des populations asiatiques actuelles. En Europe, ses fréquentations avec les néandertaliens valent aujourd'hui aux populations non africaines modernes de posséder en moyenne 2 % d'ADN néandertalien. Et les groupes d'*H. sapiens* qui se dispersent alors connaissent un meilleur succès démographique. De nombreuses études l'ont d'ailleurs montré ces dernières années ; à cette époque, le génome de notre espèce s'est grandement diversifié ! Pourtant, certains de ces groupes vont connaître un sort similaire à ceux qui les ont précédés, finissant par s'éteindre sans nous laisser d'autre héritage que leurs ossements : on ne trouve aucune trace d'eux dans le génome des populations actuelles. C'est le sort qu'a connu, par exemple, l'homme d'Ust'-Ishim, identifié à partir d'un fémur découvert en Sibérie et daté de -45 000 ans. Même chose pour les habitants qui occupaient la grotte de Bacho Kiro, en Bulgarie, il y a 43 000 ans, ou encore le métis néandertalien-*sapiens* — le premier du genre



J.-C. DOMENECH/MNHN

« Il faut se figurer le climat et l'environnement de l'époque pour comprendre comment ils ont pu influencer les mouvements humains »

Sandrine Prat, paléoanthropologue du CNRS au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris

ADAPTABILITÉ

L'aventure migratoire d'« Homo erectus »

Homo sapiens a beau s'être aujourd'hui répandu sur toute la planète, il n'est pas le premier de son genre à quitter l'Afrique. Bien avant lui, *Homo erectus* tentait l'aventure. Ce premier humain pleinement bipède a foulé la Terre entre 1,9 million d'années et 50 000 ans avant le présent, et il a laissé des traces dans une grande partie de l'Eurasie. Les plus vieilles, datées de -1,81 million d'années, ont été trouvées à Dmanissi, en Géorgie, grâce à une série de cinq crânes. Leur morphologie très variable et archaïque est typique des fossiles d'*Homo erectus* dont la distribution s'étend sur une très longue période et sur de vastes territoires, donnant ainsi lieu à diverses sous-espèces, ou variantes régionales. On soupçonne d'ailleurs *Homo erectus* d'avoir vécu sur l'île de Java, où l'on a trouvé des fossiles vieux de 1,8 million d'années à 700 000 ans, mais aussi près de l'actuelle commune de Lézignan-la-Cèbe, en Occitanie, comme en témoignent des outils vieux de 1,2 million d'années… Ou encore en Espagne, dans la Sierra de Atapuerca, il y a 1,4 million d'années, d'après des os du visage présentés cette année par des chercheurs espagnols — des os qui esquissent les traits de l'un des tout premiers habitants humains d'Europe occidentale. Enfin, cette année encore, une équipe de chercheurs a reconstitué le paléoenvironnement du site d'Engaji Nanyori, en Tanzanie, qui avait livré plusieurs fossiles et outils d'*Homo erectus,* montrant que l'endroit était, il y a environ 1 million d'années, très aride. *H. sapiens* n'a donc pas l'apanage d'une grande adaptabilité !

à être découvert par des paléoanthropologues, en 2015 — qui vivait dans la grotte d'Oase, en Roumanie, il y a 38 000 ans. Mais qu'est-il arrivé à ces groupes disparus ? Difficile à dire, comme il est toujours impossible de déterminer avec certitude les raisons de la disparition des néandertaliens et d'autres espèces humaines. *« Étant donné que néandertaliens et dénisoviens disparaissent peu ou prou à cette même époque, il n'est pas impossible qu'une même période de crise ait aussi affecté ces groupes d'*Homo sapiens *disparus »*, explique Antoine Balzeau. Mais contrairement à ses cousins, *H. sapiens* endure et survit. Les groupes qui s'établissent à travers l'Europe il y a 36 000 ans, comme ceux de la grotte de Buran Kaya, en Crimée, ont laissé leur trace dans notre génome.

L'écueil de la surinterprétation

Chacun de ces sites archéologiques contribue à mieux comprendre l'histoire mouvementée de notre espèce, mais la prudence reste de mise lorsqu'il s'agit d'en faire le récit. *« Quand on veut tisser une chronologie ou une cartographie de la dispersion d'*H. sapiens *dans le monde, il est très difficile de ne pas tomber dans l'écueil de la surinterprétation,* souligne Antoine Balzeau. *Le registre archéologique actuel ne forme pas un maillage suffisant. Tous ces schémas migratoires sont tracés à partir de points fixes, les sites archéologiques, qu'on relie par des lignes. Or, quand on trouve un fossile ou un outil dans une caverne, cela ne nous apprend pas nécessairement quand l'humain s'y est installé, ni d'où il venait, ni combien de temps il y est resté. Et s'il en est reparti, on ne saurait dire ni par où, ni quand, ni comment, ni pourquoi.* » La présence d'*Homo sapiens* à un endroit à un moment donné est somme toute une information aussi riche que limitée. ■ **W. R.-P.**

Le cercle des « Homo » disparus

Dernière du genre « Homo », notre espèce s'est longtemps crue seule sur Terre. Ce n'est qu'au XXIe siècle que les fouilles ont révélé qu'outre Neandertal, elle avait côtoyé des cousins, éteints depuis quelques dizaines de milliers d'années.

Figurez-vous un extraterrestre visitant la Terre il y a entre 150 000 et 300 000 ans, et doté, comme l'imagine, pince-sans-rire, l'archéologue britannique Linda Hurcombe, de l'université d'Exeter, *« d'un intérêt improbable pour l'évolution humaine »* (1). *« Il aurait pu conclure qu'*Homo sapiens *était simplement l'une des nombreuses espèces du genre* Homo [voir l'illustration p. 81] », estime-t-elle. Car notre humanité était alors aussi diverse que disséminée. Survolant l'Afrique, il y aurait vu les premiers *H. sapiens* déployer leurs silhouettes longilignes taillées pour de longues marches ainsi que les derniers *H. naledi* aussi graciles que minuscules ; dans toute l'Europe et dans l'ouest de l'Asie, il aurait repéré les néandertaliens agiles aux carrures massives ; en Sibérie et sur les montagnes du Tibet, il aurait pointé les dénisoviens adaptés à des environnements extrêmes ; et poussant jusqu'au-dessus des îles du Sud-Est asiatique, il aurait observé les lilliputiens d'Indonésie, les *H. floresiensis* côtoyant des rats et des lézards géants ou encore les *H. luzonensis* de l'île de Luçon aux Philippines. Et peut-être bien plus… Car si le nombre connu de cousins *Homo* n'a plus évolué depuis 2019, d'autres fouilles pourraient encore enrichir le cercle de famille des disparus.

Mais revenons à notre extraterrestre. S'il nous avait à nouveau rendu visite il y a environ 25 000 ans à 30 000 ans, il aurait sans doute été surpris, dit Linda Hurcombe, de constater que ce foisonnement s'était asséché et qu'*H. sapiens* était désormais le dernier type d'hominine *(lire le repère p. 72)* sur la planète. Le seul à avoir colonisé tous les espaces et environnements, y compris les plus hostiles *(lire p. 73),* tandis que les autres disparaissaient.

Un fascinant melting-pot difficile à démêler

Peut-on en conclure avec l'humour noir du préhistorien américain John J. Shea, de l'université de Stony Brook, que *« le rapport de fin de stage de notre espèce aurait pu se lire comme suit : "ne s'entend pas bien avec les autres"* » ? (2). Car en même temps que nous découvrions de nouveaux cousins, nous les perdions irrémédiablement, et les hypothèses — climatiques, volcaniques, guerrières, biologiques — allaient bon train pour savoir pourquoi ils s'étaient si vite éteints, tandis que nous connaissions un succès inégalé. Serions-nous, sinon coupables, du moins responsables de leur sort ?
En réalité, nous ne savons pas exactement comment *H. sapiens* interagissait

HEATHER AINSWORTH/AP/SIPA

Des « Homo » anatomiquement différents se sont côtoyés avant même qu'« Homo sapiens » ne s'hybride avec Neandertal (bustes réalisés par le paléo-artiste américain John Gurche).

avec ses autres contemporains du même genre. Les scientifiques ne s'entendent pas pour dire à quel point il a joué un rôle dans la disparition des autres, même si celui-ci n'est sans doute pas négligeable. Nous savons, grâce à l'ADN et aux avancées de la paléogénomique, que notre ancêtre s'est métissé avec les dénisoviens et avec les néandertaliens. Mais nous nous demandons toujours s'il s'est hybridé ou non avec les espèces de petite taille comme *H. naledi*, *H. floresiensis* et *H. luzonensis*. Une certitude : *H. sapiens* n'a pas fait que toiser Neandertal de loin. Il y a eu échange de matériel génétique donc accouplements entre leurs deux espèces, *« même s'il est difficile de dire s'ils sont la conséquence de rapts, de viols, ou de rencontres harmonieuses et d'échanges de femmes entre les lignées »*, souligne Jean-Jacques Hublin, titulaire de la chaire de paléoanthropologie au Collège de France. Là encore, on ne peut généraliser un comportement. Certains pensent que les deux cousins ont tissé des liens étroits très tôt. Direction le Levant, plus précisément Israël, entre les hauts plateaux de Judée et la plaine côtière méditerranéenne. Il y a 130 000 à 80 000 ans, la région était très prisée : quatre sites du paléolithique moyen — Qafzeh, Skhul, Tabun C1 et Nesher Ramla — ont déjà livré des pré-néandertaliens sortis d'Afrique quelques centaines de milliers d'années plus tôt, des néandertaliens revenus dans le coin depuis l'Eurasie, des *H. sapiens* « archaïques » venus d'Afrique et peut-être même des hybrides des deux derniers (sujet de vifs débats dans la communauté scientifique, qu'aucune trace d'ADN ne permet de trancher). Un fascinant *melting-pot*, donc, que vient encore enrichir la mise au jour de cinq sépultures troglodytes vieilles de 100 000 ans — les plus anciennes au monde de ce type — sur le site de Tinshemet, dans le centre d'Israël. Les scientifiques n'ont pas attendu de nommer l'espèce des deux premiers squelettes bien dégagés (on sait seulement

CLASSIFICATION

« Homo juluensis », casse-tête chinois

Christopher Bae, de l'université d'Hawaii (États-Unis) et Xiujie Wu, de l'Institut de paléontologie des vertébrés et de paléoanthropologie de Pékin (Chine), ont proposé dans *Nature Communications* fin 2024 de réunir les divers fossiles découverts dans le nord de la Chine depuis les années 1970 sous le nom d'*Homo juluensis* (du chinois *ju lu* signifiant « grosse tête »). Pratique ou… fourre-tout ? Le problème, selon Florent Détroit, paléoanthropologue au musée de l'Homme, lui-même découvreur d'*Homo luzonensis,* c'est que la nouvelle espèce n'a pas été détaillée, ni publiée dans une revue soumise à relecture par des pairs, mais dans un livre auquel peu de chercheurs ont encore eu accès. Vu la diversité des fossiles, un seul article n'aurait pas suffi à convaincre. Le livre y parviendra-t-il ? Rien n'est moins sûr, des chercheurs étant persuadés que certains fossiles sont des dénisoviens.

HÉRÉDITÉ

Ce que l'on doit à Neandertal

ROBIN HAMMOND/PANOS-REA

Les populations actuelles non africaines possèdent une petite partie du génome de Neandertal, qui confère entre autres une meilleure résistance aux virus.

Bien que disparus il y a plus de 30 000 ans, Neandertal et Denisova ont légué des variantes de gènes parfois précieuses, parfois délétères à des populations modernes. *« C'est à eux que les Inuits de l'Arctique doivent leur capacité à métaboliser la graisse brune, pour produire de la chaleur en cas de froid, ce qui participe à la survie des nouveau-nés »*, explique la paléoanthropologue Silvana Condemi. C'est aussi une version du gène EPAS1, provenant des dénisoviens, qui a permis aux Tibétains de s'adapter aux hautes altitudes. L'hérédité de Neandertal est plus marquée dans les gènes liés à la kératine, une protéine fibreuse qui confère sa résistance à la peau, aux cheveux et aux ongles et permet une meilleure protection dans des environnements plus froids. De cet ancêtre, nous avons aussi acquis une meilleure résistance aux virus.

Mais certaines mutations délétères chez *Homo sapiens* pourraient aussi trouver une origine chez Neandertal : ce serait le cas pour des maladies à composante génétique, comme le diabète ou encore la maladie de Crohn. Et, on l'a vu avec le Covid-19 : un segment de chromosome provenant de notre cousin disparu — porté par 50 % de la population en Asie du Sud et 16 % en Europe — multiplie par trois les risques de développer une forme sévère de détresse respiratoire. D'où la question de Lluis Quintana-Murci, professeur de génétique humaine et évolution au Collège de France et directeur de recherche à l'Institut Pasteur : les régions génétiques qui ont subsisté auraient-elles joué un rôle bénéfique jusqu'à ce que nous bouleversions profondément notre environnement ? Certaines seraient alors devenues inutiles, voire délétères.

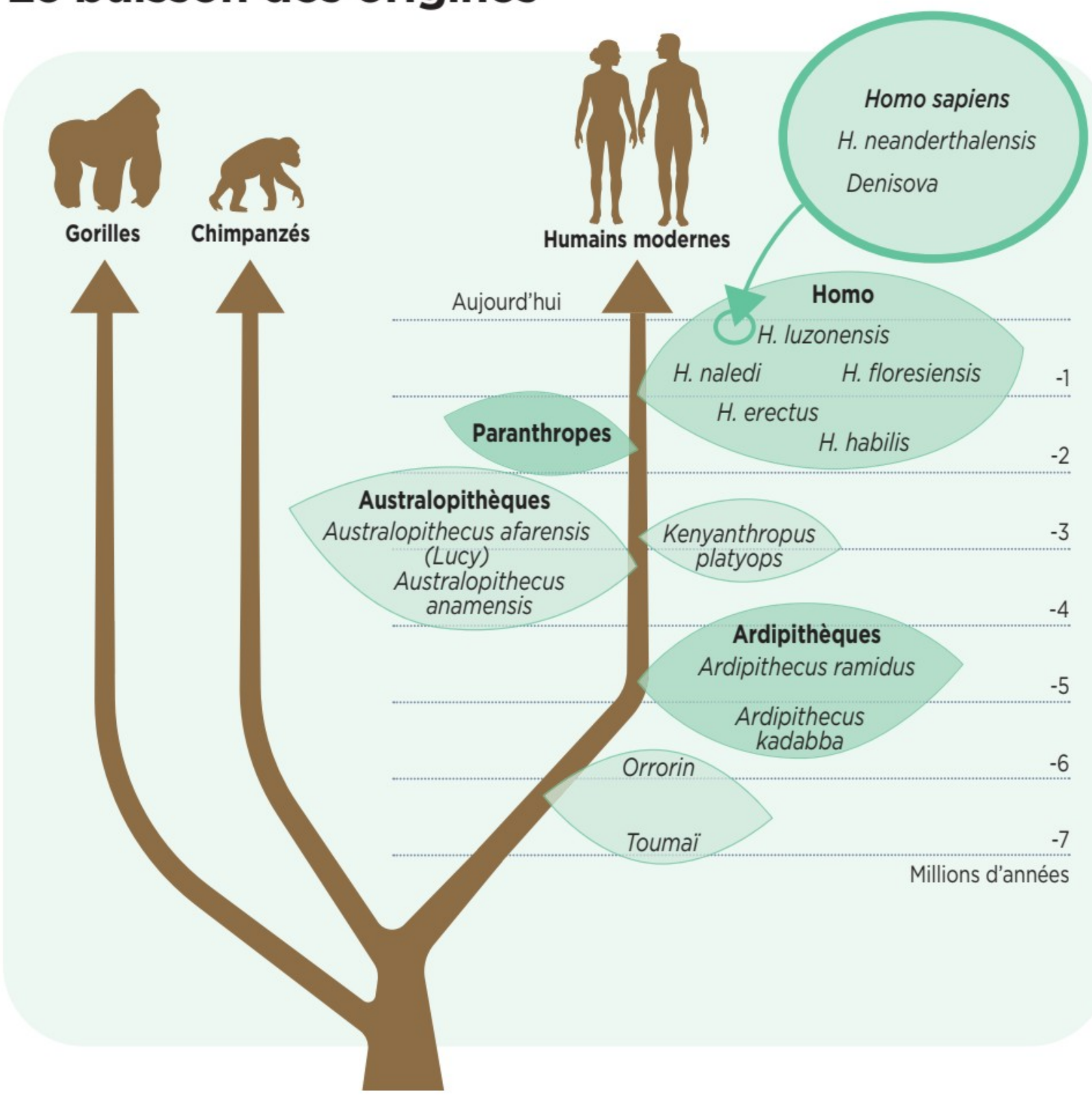
que ce ne sont pas des néandertaliens) pour les publier dans *Nature Human behaviour*, en mars, car à leurs yeux, l'essentiel est ailleurs. En effet, les occupants de Tinshemet partageaient la même tradition que ceux des quatre autres sites : même façon d'enterrer les morts en position fœtale et en présence de mobilier funéraire venu de loin (du bois, des os), même omniprésence de l'ocre pour orner les corps, même technique de taille des silex, même recours accru à la chasse au gros gibier.

Des partages de connaissances entre différents « Homo »

Bref, il existait une culture régionale. *« Pendant 50 000 ans, les* Homo *anatomiquement différents qui ont vécu dans la région ont interagi, partagé leurs connaissances et leurs coutumes, et se sont influencés durablement, échangeant des stratégies de chasse, conseils de fabrication d'outils et rituels mortuaires hautement symboliques »*, estime le paléolithicien Yossi Zaidner, de l'université hébraïque de Jérusalem (Israël), premier auteur de l'article. *« Cette interaction, datant d'environ -100 000 ans, remet en question l'idée d'une simple concurrence entre les deux espèces »*, renchérit l'anthropologue Israel Hershkovitz, de l'université de Tel-Aviv et codirecteur des fouilles de Tinshemet. *« Je crois que ces hominines du paléolithique moyen n'accordaient aucune importance à leurs différences morphologiques »*, poursuit-il. Un propos qui fait écho à ceux de la paléogénéticienne Évelyne Heyer *(lire l'entretien p. 82)*. Quoi qu'il en soit, si ces premiers échanges ont été fructueux sur un plan charnel, nous n'en portons nulle trace dans notre ADN. Un peu comme s'il s'agissait d'une branche morte de la famille.

Car c'est bien plus tard que s'écrit l'histoire des hybridations entre Neandertal et *H. sapiens*. Celle qui fait que les non-Africains portent 1 à 2 % de gènes néandertaliens aujourd'hui *(lire l'encadré ci-contre)*. Au regard de la préhistoire, notre union a été brève, et n'a

Le buisson des origines



Issus d'une longue et touffue lignée de primates multimillionnaires en âge, les *Homo sapiens*, nés il y a environ 300 000 ans en Afrique, sont aujourd'hui à la fois seuls et partout sur Terre. Mais ils ont eu, il y a quelques centaines ou dizaines de milliers d'années, de nombreux contemporains du genre *Homo*, désormais tous éteints. En Afrique, *Homo naledi* de -335 000 à -236 000 ans ; en Eurasie, *Homo neanderthalensis* de -400 000 à -40 000 ans ; en Asie, Denisova de -400 000 à peut-être -30 000 ans ; en Asie du Sud-Est, *Homo floresiensis* de -100 000 à -60 000 ans et *Homo luzonensis* de -67 000 à -50 000 ans. Les célèbres australopithèques, dont Lucy, sont eux aussi des branches mortes de l'évolution.

duré que 7000 ans, durant lesquels les deux espèces se sont mêlées, accouplées, ont formé des couples mixtes, donné naissance à des métis. Deux études, publiées indépendamment dans *Science* et *Nature* fin 2024, sont parvenues à des conclusions concordantes en étudiant 58 génomes séquencés d'*H. sapiens* ayant vécu en Eurasie au cours des 45 000 dernières années et les génomes de 275 humains du monde entier. Verdict : ces rencontres ont commencé il y a 47 000 ans et se sont poursuivies jusqu'à l'extinction de l'homme de Neandertal, il y a environ 40 000 ans.

« Notre histoire avec les dénisoviens — ces cousins dont nous avons découvert l'existence en 2010 grâce à l'ADN vieux de 50 000 ans extrait d'une phalange d'une fillette de Sibérie — s'est, elle, déroulée en deux temps d'hybridation distincts », précise Sharon Browning, de l'université de Washington à Seattle (États-Unis). Le génome des Papous d'aujourd'hui provient à 5 % de celui de l'homme de Denisova. Mais certaines des séquences d'ADN retrouvées chez les Asiatiques de l'Est, notamment les Chinois Han, les Chinois Dai et les Japonais, sont à la fois différentes et beaucoup plus proches de celles des dénisoviens, même si les généticiens ne savent pas quand et où le métissage s'est produit. Nos histoires de familles n'ont pas fini d'être racontées. ■

R. F.

Notre union avec Neandertal a été brève et n'a duré que 7000 ans, durant lesquels les deux espèces se sont mêlées, accouplées, ont formé des couples mixtes

(1) *Quaternary environment and humans*, vol. 2, mars 2024.
(2) *Current Anthropology*, 2011.

ÉVELYNE HEYER

PROFESSEURE D'ANTHROPOLOGIE GÉNÉTIQUE
AU MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE, À PARIS

« Sapiens a tiré son épingle du jeu collectivement, puis individuellement »

ALBERT FACELLY / DIVERGENCE

Forte croissance démographique et culture cumulative sont deux avantages majeurs qui ont permis à Sapiens d'être la seule espèce « Homo » survivante.

Comment expliquer l'expansion planétaire d'une seule espèce — la nôtre —, alors qu'elles étaient si nombreuses à la préhistoire, à fourmiller, y compris hors du berceau africain ?

C'est probablement la question la plus importante que l'on puisse se poser concernant l'évolution humaine. Elle nous obsède et nous aveugle parfois. Cette issue « triomphante » a en effet longtemps occulté l'idée même de qualités propres à d'autres espèces, comme Neandertal, considéré longtemps comme un « demeuré ». Or, c'était un grand chasseur, très bien adapté aux rigueurs des hivers européens. Par la suite, les études ont montré que Denisova était imbattable en haute altitude, bien avant qu'*Homo sapiens* ne s'installe sur le plateau tibétain. Nous n'étions pas forcément les premiers ni les meilleurs en tout. Mais nous avons indubitablement tiré notre épingle du jeu, collectivement, puis individuellement.

Quel rôle a joué la fécondité dans notre succès ?

Alors que Neandertal était sur le déclin il y a plus de 40 000 ans, comme si sa disparition était annoncée dans ses gènes, les généticiens observent alors une forte croissance démographique chez les chasseurs-cueilleurs *H. sapiens*, avant même la transition néolithique *[une domestication des plantes et des animaux, accompagnée d'un établissement des populations humaines]*. Il y a ensuite une accélération démographique chez les populations *H. sapiens* qui vont devenir agricultrices, moindre chez celles qui vont devenir pastorales. En revanche, elle n'existe pas chez celles qui resteront chasseuses-cueilleuses.

Le cercle familial a-t-il été un autre avantage ?

Contrairement aux mères chimpanzés, par exemple, les mères du genre *Homo* confient leurs enfants à d'autres pour les élever, les porter, les nourrir. Plus le cercle est élargi, plus le clan est structuré, et plus le petit a de parents pour s'occuper de lui. Cela a permis chez notre espèce en particulier une longue acquisition des connaissances. Nous sommes des êtres de liens et cela nous a réussi. La culture cumulative nous a permis de transmettre sans tout réinventer à chaque fois. Les africanistes ont souvent souligné l'importance du symbolisme, car il démontre notre capacité à projeter des concepts abstraits de statut social, de parenté et de communauté. Il a décuplé nos capacités de communication. Reste que nous ignorons si, à la préhistoire, quand il a croisé Neandertal ou Denisova, *H. sapiens* avait conscience d'avoir affaire à d'autres espèces que la sienne. Comment définir le « je », le « nous », les « autres » ? Quand décider de « faire avec les autres », de « faire contre les autres », ou même de « faire avec les uns contre les autres » ? ■

Propos recueillis par R. F.

« Le symbolisme démontre notre capacité à projeter des concepts abstraits de statut social, de parenté et de communauté »

REJOIGNEZ LE PREMIER PÔLE SCIENTIFIQUE DE LA PRESSE FRANÇAISE

SCIENCES ET AVENIR

LE MENSUEL

LE HORS-SÉRIE

UNE INFORMATION THÉMATIQUE
CLAIRE ET VIVANTE

Chaque trimestre, une thématique étudiée sous tous ses aspects, en compagnie des plus grands spécialistes.

UNE VISION COMPLÈTE
DE LA SCIENCE

Chaque mois, toute l'actualité scientifique, dans un langage accessible.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur sciencesetavenir.fr

39 JOURNALISTES PASSIONNÉS

19 PARUTIONS PAR AN

4,6 MILLIONS DE LECTEURS

2,6 MILLIONS DE SOCIO-NAUTES

2,7 MILLIONS DE VISITEURS SUR LE SITE

3 APPLICATIONS IOS/ANDROID

La Recherche

LE TRIMESTRIEL

LA RÉFÉRENCE
INCONTOURNABLE

Chaque trimestre, un panorama complet en 150 pages de la recherche scientifique.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur larecherche.fr

2 SITES POUR DES INFOS EXCLUSIVES

TOUTE L'ACTUALITE SCIENTIFIQUE QUOTIDIENNE

2 sites au service de l'actualité scientifique, de la plus accessible à la plus innovante. **Des articles quotidiens** pour être à la pointe de la science.

Vos questions en direct aux chercheurs sur notre chaîne Twitch https://www.twitch.tv/sciencesetavenir/

plus de 2 millions de fans !	plus de 303 000 followers	plus de 165 000 instagrammeurs	Plus de 67 000 abonnés professionnels	plus de 23 000 abonnés

PROMINT-SCAV2

HOUPLINE-RENARD/SIPA

Des messages cachés sur l'obélisque de la Concorde

Un égyptologue français a identifié et décodé une série d'inscriptions dissimulées sur le célèbre monument parisien. Des informations inédites concernant le règne de Ramsès II, pharaon qui le fit ériger à l'entrée du temple de Louxor au XIIIe siècle avant notre ère.

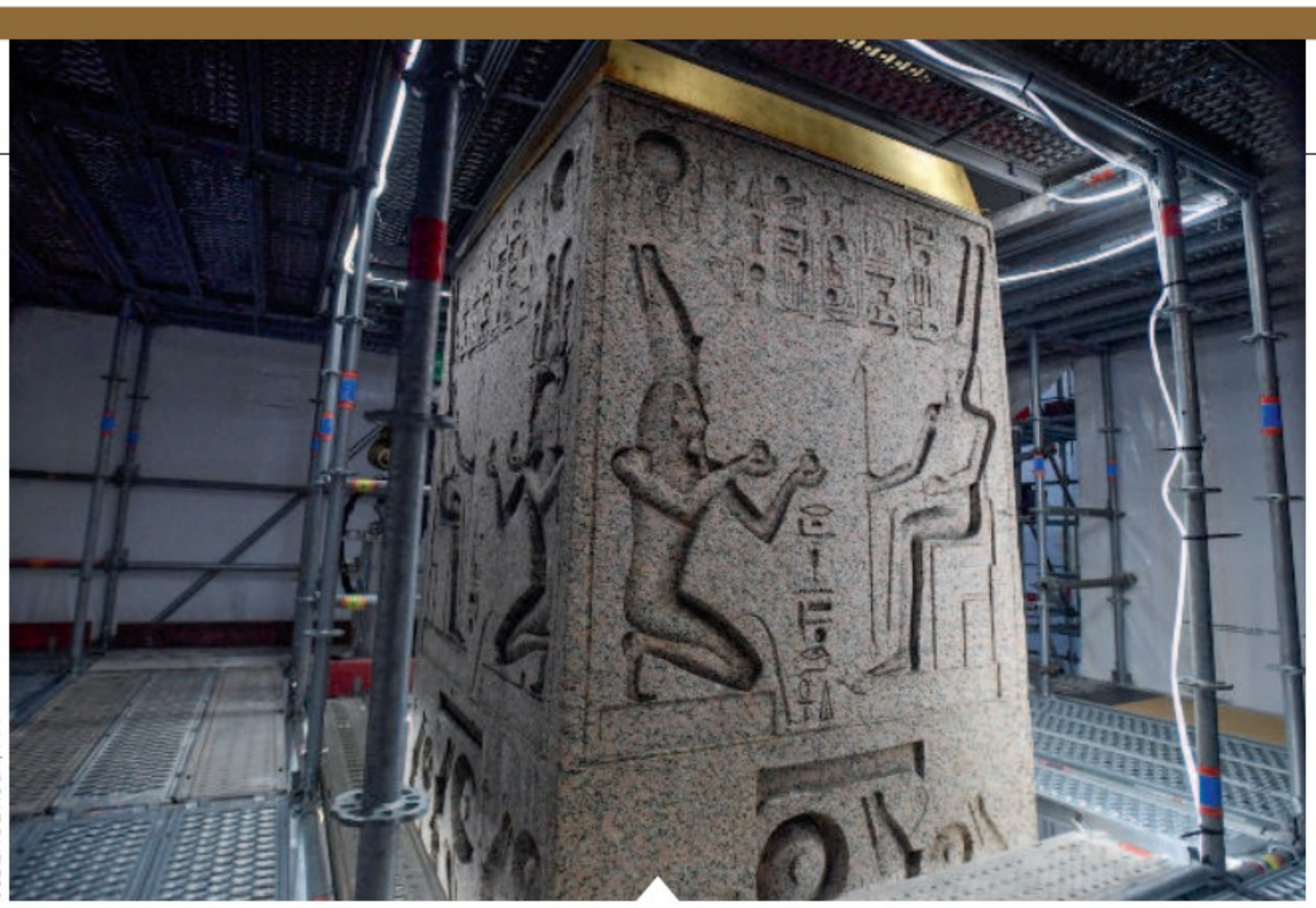
C'est le premier égyptologue depuis Champollion à être monté au sommet de l'obélisque de la Concorde. Et l'ascension en valait la peine. Le Français Jean-Guillaume Olette-Pelletier, chargé d'enseignement à l'Institut catholique de Paris, a découvert une série de textes cachés sur le plus vieux monument de la capitale, offert en 1828 par le vice-roi d'Égypte Méhémet Ali à la France, sous Louis-Philippe. Ces inscriptions, passées jusqu'ici inaperçues, livrent des informations inédites sur le règne de Ramsès II, pharaon qui le fit ériger à l'entrée du temple de Louxor au XIIIe siècle avant notre ère.

Alors qu'en 2020, le pays se trouve en plein confinement, Jean-Guillaume Olette-Pelletier prend pour habitude d'aller admirer le vestige égyptien lors de sa promenade quotidienne autorisée dans un périmètre d'un kilomètre. *« J'habitais à l'époque dans le VIIIe arrondissement, alors je marchais jusqu'à l'obélisque et je lisais les hiéroglyphes sur ses faces pour me détendre,* se souvient l'épigraphiste. *Je me suis rendu compte à un moment de quelque chose d'inhabituel : une partie des hiéroglyphes pointaient dans une direction, celle du portique du temple de Louxor. Mais ce n'était que le début. »*
Jean-Guillaume Olette-Pelletier constate que personne, dans la littérature scien-

JGOP

« Seule une certaine élite était capable de comprendre ces messages cachés, considérés comme un langage des dieux »

Jean-Guillaume Olette-Pelletier, chargé d'enseignement à l'Institut catholique de Paris



JULIEN DE ROSA / AFP

Cette scène où le pharaon fait une offrande au dieu Amon, présente « côté Seine », faisait face au Nil et ne pouvait être visible que depuis un angle de 45° (ici en restauration).

tifique, n'a jamais analysé les différentes scènes dans lesquelles apparaît le pharaon. *« Alors je suis venu sur place durant plusieurs jours avec mon matériel, notamment mes jumelles. J'ai compris que l'obélisque comportait une cryptographie hiéroglyphique multiple. »* Mis au jour dans les années 1950 par le chanoine Étienne Drioton, ces messages secrets sont des sortes de rébus ou de textes secrets insérés dans les inscriptions hiéroglyphiques. *« Si certains Égyptiens pouvaient lire les hiéroglyphes, seule une certaine élite était capable de comprendre ces messages cachés, considérés comme un langage des dieux »*, explique le spécialiste.

En 2022, ce dernier va plus loin en démontrant que ces textes peuvent être parfois dissimulés dans des contextes tridimensionnels. Et il estime que c'est le cas sur l'obélisque de la Concorde. Pour le vérifier, il obtient l'autorisation de monter sur un échafaudage destiné à la rénovation du monument en vue des jeux Olympiques de 2024. Durant plusieurs jours, il peut ainsi faire des relevés au sommet et mettre en lumière plusieurs niveaux de cryptographie sur l'obélisque.

Il y a d'abord la façon dont sa face supérieure « côté Seine » doit être lue. *« Elle faisait face au Nil et ne pouvait être vue que depuis un angle de 45°. Placé autrement, on ne voyait rien. »* On y distingue Ramsès faisant une offrande au dieu Amon avec, sur la tête, une couronne différente de celle portée sur les trois autres faces : le pschent, qui représente l'union des couronnes rouge et blanche, images respectives de la Basse et Haute-Égypte (*lire l'encadré*). *« Lorsque j'ai calculé où il fallait se placer à l'époque pour pouvoir admirer cette partie de l'obélisque, je suis tombé en plein milieu du Nil. Elle n'était destinée qu'à être vue par les nobles arrivant par bateau au temple de Louxor lors de la fête annuelle d'Opet, célébrant le retour des forces vitales du dieu Amon. »* Ramsès y rappelle ainsi d'emblée à ceux qui ont le pouvoir de le renverser qu'il a été choisi par les dieux pour régner sur l'Égypte unifiée. *« C'est un véritable message de propagande ! »*

Sept jeux d'iconographies cryptiques repérés

Mais ce n'est pas tout. Sur la face est de l'obélisque (dans la direction du nord de Paris mais qui, dans le temple, était tournée vers le désert), la couronne *tni* portée par Ramsès II cache un hiéroglyphe. *« On distingue à l'intérieur de la coiffe des cornes de taureau qui ne sont pas présentes sur les coiffes des trois autres faces. Elles forment le mot "ka", qui désigne la force vitale de la divinité. »* Sous la figure du roi, se trouve aussi un autre élément d'importance : un rectangle qui se réfère au signe de la table d'offrandes et signifie « apaiser ». Ensemble, ces détails forment une phrase cryptique : *« Apaiser la force-ka d'Amon. » « Elle rappelle que les hommes doivent sans cesse faire l'offrande aux divinités afin d'apaiser leur force vitale parfois destructrice. »*

Au total, l'égyptologue a repéré sept jeux d'iconographies cryptiques sur l'obélisque. L'un d'entre eux combine même toutes les faces de l'obélisque : en associant différents signes d'une face à une autre, on peut lire le nom du pharaon, « Ousermaâtrê Nebkhepesh », employé par Ramsès II à la fin de l'an 2 de son règne. *« Dans notre langage écrit, on distingue aujourd'hui parfaitement le texte de l'image. Ces découvertes nous rappellent que chez les Égyptiens, ils ne faisaient qu'un »*, conclut le chercheur. ■

Marine Benoit

ASCENDANCE

Ramsès II, un pharaon en quête de légitimité

Parce qu'il est né avant que son père Séthi Ier ne soit lui-même pharaon, Ramsès II a cherché activement à légitimer sa place sur le trône durant ses premières années de règne. *« Dans la tradition pharaonique, le roi est un dieu sur terre. Il est successeur du dieu faucon Horus, et c'est en tant qu'Horus qu'il engendre son héritier amené à régner sur la Haute et la Basse-Égypte*, assure Jean-Guillaume Olette-Pelletier. *Or, lorsque Séthi Ier monta sur le trône, Ramsès II était déjà adolescent et ne pouvait donc jouir de cette naissance divine. »* En l'an 2 de son règne, Ramsès II procède à une modification de son nom : alors baptisé Ousermaâtrê, « le puissant et juste de Rê », il ajoute Setepenrê, « élu de Rê », se créant ainsi une ascendance directe avec le dieu soleil Rê. *« Cette modification est inscrite sur les faces de l'obélisque de la Concorde, puisqu'on y retrouve les deux noms. Ce détail permet de dater sa gravure, qui s'est donc faite en deux phases : l'une avant l'an 2 de son règne, et l'autre juste après. »*

Camille Flammarion et les forces psychiques

L'astronome, dont on célèbre en 2025 le centenaire de la mort, a connu aussi un énorme succès populaire en librairie pour ses ouvrages sur les sciences occultes. Même si ces travaux ont pu miner sa crédibilité scientifique aux yeux de la postérité, cet intérêt doit être replacé dans un contexte d'engouement pour les phénomènes de l'esprit.

Par Elsa Courant

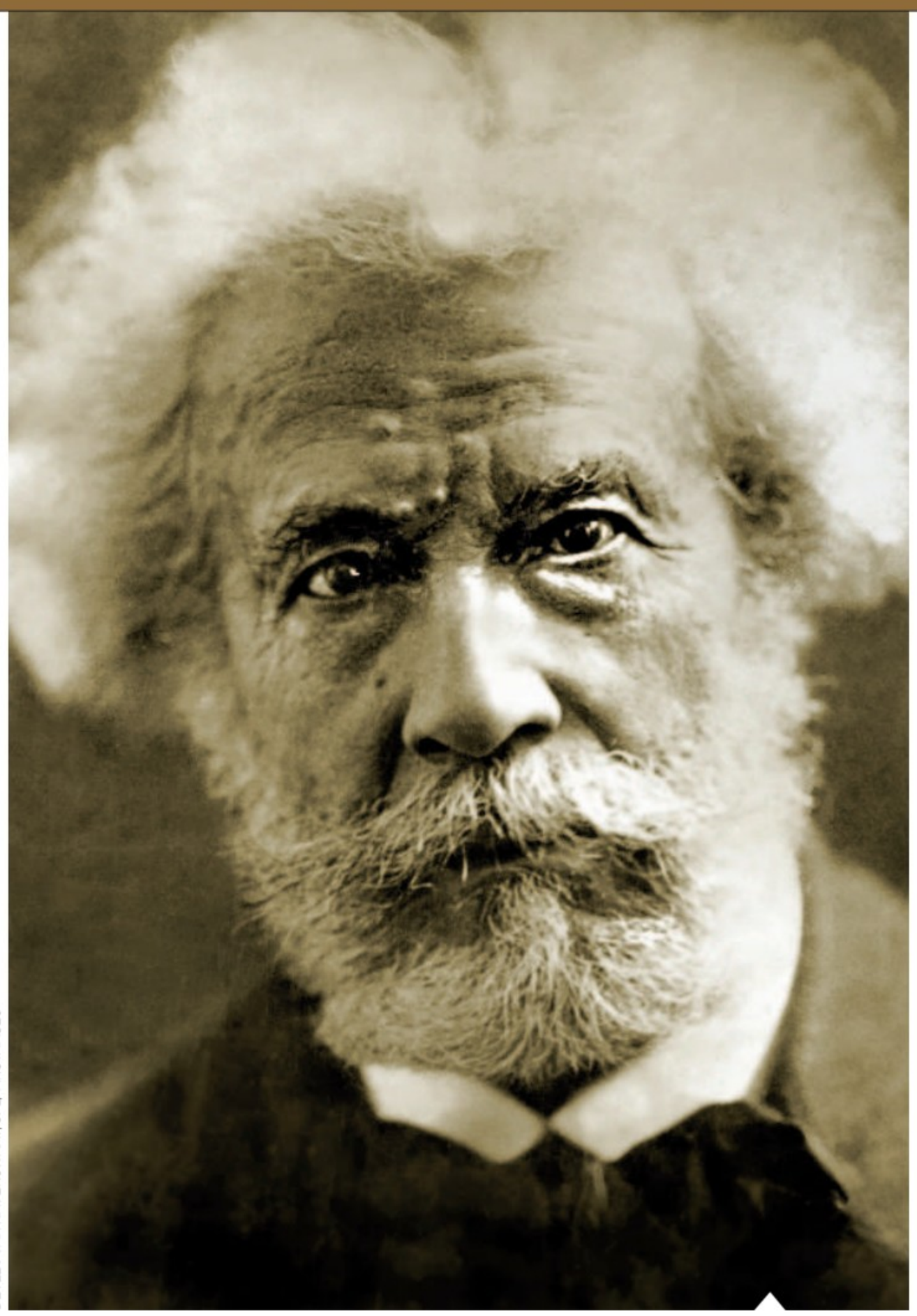
Printemps 1924. Dans la librairie d'Ernest Flammarion, les glaneurs découvrent le dernier livre d'un des plus grands auteurs à succès du XIXe siècle : *La Mort et son mystère*, une trilogie de son frère Camille Flammarion qui s'achève sur le volume intitulé : *Après la mort*. Cette œuvre testamentaire fait la synthèse de décennies de méditation sur les *« graves problèmes »* de l'existence de l'âme et de sa survivance. Flammarion a 82 ans. À la veille de sa mort en 1925, l'astronome compile inlassablement les témoignages qui lui parviennent du monde entier, pour établir la preuve des phénomènes liés à ce qu'il appelle la *« force psychique »*.

Le thème de ce livre traverse tous ses ouvrages du début à la fin de sa carrière d'auteur. Dès 1862, dans *La Pluralité des mondes habités*, le jeune Camille, alors élève astronome à l'observatoire de Paris, s'appuie sur ses observations astronomiques pour tracer les conditions de possibilité d'une vie extraterrestre sur les planètes du Système solaire. Mais à ce sujet, il rêve déjà de *« mondes supérieurs »* où *« le venin de la mort »* et *« le trépas glacé »* ne sont qu'un voyage menant à des retrouvailles, *« le départ d'une âme vers des familles aimées »*. Son premier succès de librairie porte en germe une ambition qui animera toute une vie de savant et de vulgarisateur : percer les mystères de l'inconnu.

ELSA COURANT

Elsa Courant est chargée de recherche CNRS au Centre d'étude de la langue et des littératures françaises à Sorbonne Université.

En effet, la science des corps célestes, qui confirme au XIXe siècle son tournant vers les mathématiques et la physique, entre dans l'ère d'une astronomie de l'invisible. Les découvertes les plus récentes démontrent sans cesse combien nos sens sont limités pour rendre compte de toutes les dimensions de l'Univers que nous habitons. En 1846, Urbain Le Verrier découvre une planète jamais observée, Neptune, par la seule puissance du calcul. À cette même période, l'application de la spectroscopie à l'observation astronomique perce le mystère de la composition chimique des étoiles, ce qu'on pensait impossible quelques années plus tôt. *« Nous ne saurons jamais étudier par aucun moyen [la] composition chimique [des étoiles], ou leur structure minéralogique »*, affirmait le philosophe Auguste Comte dans la dix-neuvième leçon du *Cours de philosophie positive* (1835). La preuve que si ! Parmi les faits scientifiques les plus média-



DETLEV VAN RAVENSWAAY/SPL/ AKG IMAGES

Camille Flammarion (1842-1925), a tenté tout au long de sa vie de démontrer l'existence de ce qu'il appelait « des forces naturelles inconnues ».

tisés, la prédiction des éclipses ou du retour des comètes — dont celle de Halley au sujet de laquelle Victor Hugo écrira un poème — confirme encore l'intérêt d'une pratique abstraite de l'astronomie dans laquelle le sensible n'est plus indispensable à l'investigation savante.

Mais quant aux savoirs sur l'invisible (l'infiniment grand, l'infiniment petit, ou les forces nouvelles telles que l'électricité), une guerre idéologique divise l'opinion savante. Pour certains, la science dispute aux religions leur prétention à expliquer le monde. En retour, les questions qui ne peuvent faire l'objet d'aucune observation ni expérimentation directes doivent être abandonnées par la science. C'est la position rigoriste adoptée par Auguste Comte, et brandie par les matérialistes qui refusent de considérer ces nouveaux points d'intérêts comme des phénomènes. Pour d'autres, au contraire, la science doit s'adapter aux nouvelles questions qui passionnent les foules, y compris celles qui touchent à l'histoire spirituelle de l'humanité. Camille Flammarion illustre bien cette voie, et espère obtenir par ses travaux la réconciliation tant espérée entre les religions et la science.

Dans ce contexte, lesdites « sciences occultes » connaissent un succès spectaculaire au moment même où la carrière d'astronome et de vulgarisateur de Camille Flammarion prend son essor : le magnétisme se met en scène sur le théâtre du médecin et magnétiseur Franz Anton Mesmer ; la mode des tables tournantes s'empare de l'Europe ; la célèbre médium Eusapia communique avec les morts dans des « séances » publiques et privées ; *Le Livre des esprits* d'Allan Kardec (1857) donne un cadre théorique à tous les espoirs des spiritualistes. Certaines personnalités d'envergure souscrivent à l'idée d'une communication des âmes défuntes et s'initient aux tables tournantes. Victor Hugo, à qui le jeune Camille Flammarion envoya dès sa parution *La Pluralité des mondes habités*, s'était passionné pour cette pratique à Guernesey. Dans un article de presse, Camille Flammarion s'est d'ailleurs vanté d'avoir eu entre les mains les précieux « cahiers rouges » dans lesquels Victor Hugo et ses proches avaient consigné les procès-verbaux de séances spirites (*Les Annales politiques et littéraires*, 7 mai 1899).

Percer par la science le secret des forces de l'esprit

Dans les *Mémoires biographiques et philosophiques d'un astronome* (1912), Camille Flammarion raconte son enthousiasme initial pour le livre de d'Allan Kardec. Au début des années 1860, il participe à *« toutes les séances de la société spirite »*. Il y rencontre des personnalités célèbres et influentes : Arsène Houssaye, Théophile Gautier, et surtout l'éditeur Didier, qui publia sa seconde édition de *La Pluralité*. À la même période, il fait paraître en deux séries des « études d'outre-tombe » intitulées *L'Autre monde*, rapport de séances spirites menées par la médium Mademoiselle Huet. À la mort d'Allan Kardec, Camille Flammarion est même proposé pour devenir président de la Société, mais le caractère religieux de ses adeptes ne peut lui convenir : c'est par la science qu'il entend percer le secret des forces de l'esprit.

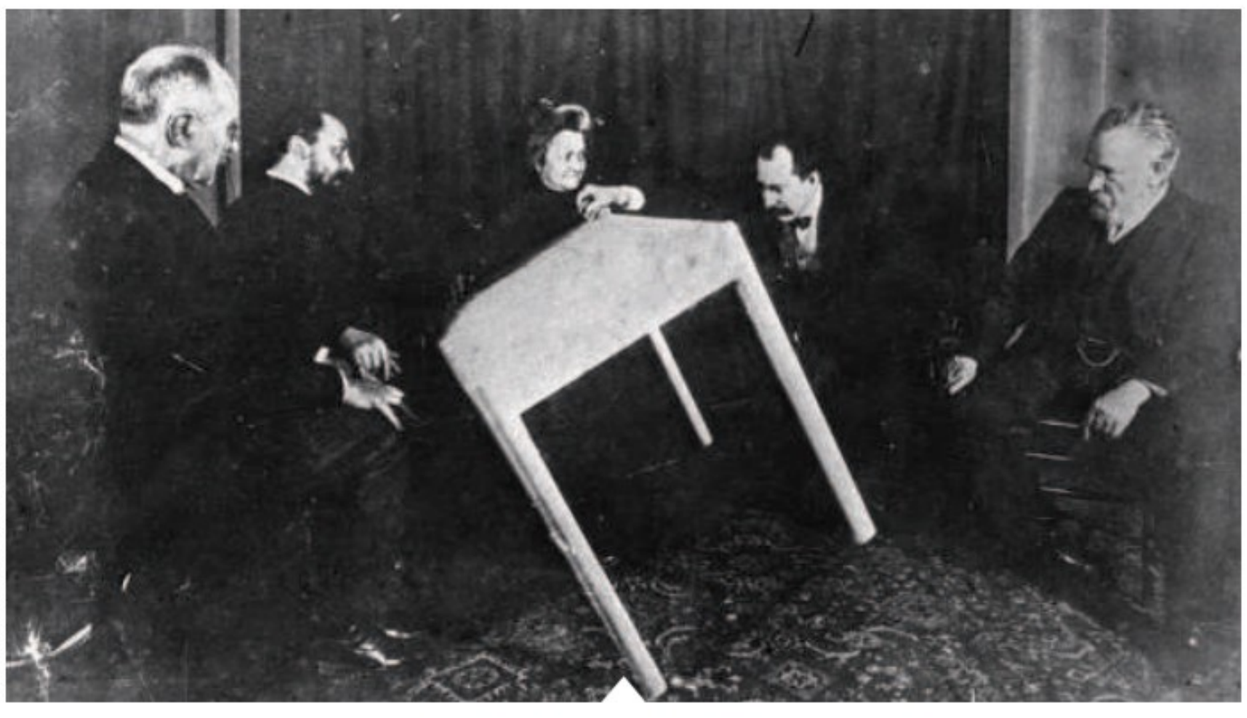
Camille Flammarion n'est pas isolé dans cette démarche d'appréhension rationnelle des phénomènes paranormaux. Dans *L'Inconnu et les*

problèmes psychiques (1900), il se dit inspiré par les travaux de la Société d'études psychiques de Londres (Royaume-Uni), qui publie un ouvrage sur les phénomènes d'esprits frappeurs en 1866. Quelques années plus tard, ce sont les savants Pierre et Marie Curie qui tentent de percer le mystère par la méthode scientifique en observant la médium Eusapia selon un protocole expérimental. Camille Flammarion en fait de même, dans une expérience menée en novembre 1898 à Juvisy… qui prouvera seulement le caractère frauduleux et théâtral des séances de la célèbre spirite (*lire l'encadré ci-dessous*).

MÉDIUM

Eusapia confondue par un cheveu

En novembre 1898, l'astronome invite la médium Eusapia à une expérience visant à prouver l'existence des phénomènes spirites. Celle-ci impose plusieurs conditions. Entre autres prérequis, une table positionnée à un angle de la pièce et un rideau derrière lequel sont disposés divers objets (une petite guitare, un tambourin, une sonnette, une pomme…), tous à portée de main de la médium. La séance devant se produire à la clarté de la Lune et d'une faible lampe, une obscurité quasi totale est requise. Il est précisé qu'Eusapia n'a pas consenti à *« se faire déshabiller, dans le but de faire contrôler ses vêtements »* avant la séance. Or, l'un des points forts de l'expérience est le déplacement d'objets, prétendument provoqué à distance par la force médiumnique de l'opératrice. Tandis qu'un pèse-lettre vient de s'abaisser spectaculairement entre les mains tendues d'Eusapia, un « contrôleur » de l'opération, M. Matthieu, se saisit d'un cheveu, habilement noué entre les doigts de la jeune femme, et qui lui tombe sur la main. Ce cheveu est encore conservé aux archives de Juvisy dans une enveloppe intitulée : *« Cheveu d'Eusapia, fraude du 12 novembre 1898 »*.



GENERAL PHOTOGRAPHIC AGENCY/GETTY IMAGES

La médium italienne Eusapia Palladino (1854–1918), ici au centre lors d'une séance de spiritisme, était réputée pour faire léviter les tables.

L'engagement de l'astronome pour démontrer l'existence des *« forces naturelles inconnues »* (dont relèveraient les esprits, la télépathie ou le don d'ubiquité) peut apparaître aujourd'hui comme la marque d'un manque d'esprit critique. Mais il ne faut pas négliger le contexte dans lequel s'inscrivent ces « recherches », et la nature assez remarquable du protocole employé pour les mener. En effet, lorsque Camille Flammarion entend tirer au clair la nature des faits relatifs au spiritisme, il en appelle aux témoignages de ses lecteurs dans la presse, au moyen d'une annonce. S'ensuit un déferlement de lettres, cartes postales et notes privées dont il s'efforcera de faire une synthèse, avec force citations, dans *L'Inconnu et les problèmes psychiques*. C'est une nouvelle forme de science populaire qui s'ébauche, mettant à contribution les récits des lecteurs comme la matière et le produit d'une recherche collective sur les phénomènes occultes. Une véritable expérience de science participative ! Pour lui, la preuve est alors établie de la réalité de ces nouveaux « phénomènes » par deux effets principaux : le nombre de témoignages (écrasant, donc, selon lui, validant), et la sensation personnellement ressentie de la sincérité de ces témoignages, en effet souvent bouleversants. Malgré les apparences d'une démarche scientifique, la preuve qu'il s'efforce d'apporter relève donc de la croyance, plus que de l'expérience…

Il reconnaît à la fin de sa vie la fragilité de ses conclusions

Sa démarche n'en demeure pas moins profondément sincère. De fait, Camille Flammarion affirmera toujours que lui-même n'a jamais personnellement vécu les « phénomènes » qu'il étudie. Son ami et ancien camarade de classe Charles Burdy, qui lui avait promis de se manifester après sa mort, n'est apparemment pas parvenu à le faire… *« Jamais je n'ai reçu de lui la moindre manifestation d'aucun genre »*, écrit-il dans ses *Mémoires*. Au sujet des tables tournantes en particulier, il déduit de l'expérience vécue par Victor Hugo et ses proches qu'en l'absence de médium prestidigitateur, *« la réunion des personnes assemblées pour faire ces évocations crée, momentanément, une personnalité psychique qui les résume »*, et qu'il rapporte à *« notre être subconscient, notre moi subliminal »*, qui agirait *« un peu comme dans le rêve »*. D'une certaine façon, l'astronome est moins convaincu par le spiritisme que… par les concepts qui fonderont la psychanalyse.

Camille Flammarion espérait obtenir par ses travaux la réconciliation tant espérée entre les religions et la science

Dans les derniers textes de sa vie, et avec une honnêteté sans faille, Camille Flammarion reconnaît que les conclusions de tant d'années d'études demeurent fragiles. Il l'avoue dans les *Mémoires* : *« Ces recherches, comme mes lecteurs le savent, n'ont pas résolu jusqu'à présent le grand problème ; mais elles nous conduisent à admettre l'existence de forces inconnues et de facultés de l'âme encore inexpliquées.* » Laissant en suspens la possibilité d'une survivance de l'âme après la mort, il écrit : *« Nous vivons au milieu d'un monde invisible.* »

Même si les « expériences » menées par Camille Flammarion sur ces « phénomènes » ont pu miner la crédibilité scientifique de ses travaux dans la postérité, il importe de replacer cet intérêt dans un mouvement général d'engouement pour les phénomènes de l'esprit. Le spiritisme, avec lequel l'astronome prit rapidement ses distances sous sa forme parareligieuse, lui permit toutefois d'être placé au centre d'un réseau de sympathisants, indispensable dans sa trajectoire savante et auctoriale. On sait que nombre de ses connaissances et amis avaient pratiqué les tables tournantes, et nul doute que ce qui s'apparentait à un divertissement de salon facilita les rencontres utiles ou enrichissantes, bien au-delà de la question spirite. Mais il reste encore beaucoup de choses à découvrir sur ce thème… Et peut-être Camille Flammarion s'était-il simplement trompé de méthode ? Aujourd'hui, ce n'est pas la science expérimentale, mais la philosophie et l'anthropologie qui s'emparent de la question des morts et qui s'efforcent d'expliquer leur présence agissante parmi les vivants, dans les traces de Vinciane Despret ou Grégory Delaplace. Il ne s'agit plus de « force psychique », mais plutôt d'héritage, de construction culturelle, d'imaginaire intérieur et de rituels solidaires. Quant à l'astronomie de l'invisible, portée par les travaux sur la matière noire ou l'Univers profond, elle perdure et s'enrichit de nouveaux secrets… ■

Une formidable diversité

11 fois par an, l'actualité des savoirs pour tous

N° 932
L'ordinateur quantique arrive !

N° 933
Prendre le contrôle de ses rêves

N° 934 Voie Lactée. Révélations sur les mystères de notre galaxie

N° 935
Spécial IA.
Ce qu'elle change

N° 936
Les pouvoirs de la respiration

N° 937
La fin du Gulf Stream

N° 938
Booster son immunité

N° 939
Les nouvelles armes

Bon de commande

Je commande les numéros ci-après au prix de : 7 € par numéro payable par chèque à l'ordre de *Sciences et Avenir* (port compris pour la France).
Bon de commande à retourner à :

Sciences et Avenir
service des abonnements
45, av. du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex

❑ N° 932 ❑ N° 933 ❑ N° 934 ❑ N° 935
❑ N° 936 ❑ N° 937 ❑ N° 938 ❑ N° 939

Nom : .....
Adresse : .....
..... Ville : .....
Code postal : .....

TRANSVERSALES

GLÉNAT

La puissance destructrice de la première bombe H soviétique alarmera Andréï Sakharov et le décidera à tout faire pour arrêter les essais nucléaires à l'air libre.

Paradoxal Sakharov

Cette BD captivante retrace le parcours hors du commun d'Andreï Sakharov, « père » de la bombe à hydrogène soviétique, devenu opposant virulent aux essais nucléaires et à l'autoritarisme de Moscou.

BD Le 30 octobre 1961 à 11 h 32, heure de Moscou, explose au-dessus de l'océan Arctique « Tsar Bomba » : « la bombe du Tsar », « la bombe reine » ou « la reine des bombes », selon les traductions. Cette bombe à hydrogène est dotée d'une puissance de 50 mégatonnes équivalent TNT, ce qui en fait la plus grosse arme nucléaire jamais mise au point, 3800 fois plus puissante que celle larguée par les États-Unis sur la ville japonaise d'Hiroshima le 6 août 1945. Parmi les concepteurs de cet engin d'horreur : un physicien génial, Andreï Dimitrievitch Sakharov. Impliqué dès 1945 dans la mise au point de la première bombe atomique de l'URSS pour, espérait-il alors, apporter un équilibre des forces entre les deux superpuissances de la guerre froide et empêcher tout nouveau conflit mondial, Andreï Sakharov déchante rapidement. Surtout, il prend conscience du fait que les essais nucléaires à l'air libre ont des effets dévastateurs sur la santé humaine, l'environnement et la biodiversité. Tout en continuant à travailler sur le programme nucléaire soviétique, il décide alors de se battre pour faire arrêter ces essais mortifères. Tsar Bomba représentera, dans cette trajectoire paradoxale, un point de non-retour, à partir duquel il entrera en dissidence, dénonçant les crimes et l'autoritarisme de Moscou, militant pour la démocratie et la paix, alertant sur les périls écologiques en cours et à venir. Un parcours scientifique et citoyen hors du commun, que cette bande dessinée, au trait clair et vif, aux couleurs sobres et modernes et à la narration hyperprécise, met en images brillamment. ■ **Vincent Glavieux**

Tsar Bomba. Les paradoxes d'Andreï Sakharov, Fabien Grolleau et Cyril Elophe, Glénat, 160 p., 22,50 €

SOMMAIRE

▶ C'est à lire p. 90
▶ C'est à voir p. 92
▶ Chroniques p. 94
▶ Questions de lecteurs p. 96
▶ Le ciel du mois p. 97
▶ Jeux p. 98

Sciences en devenir

HISTOIRE Prélude à l'âge moderne, le XVIe siècle est une époque mal connue, *« souvent insaisissable »* pour *« nos esprits rationnels et méthodiques du XXIe siècle »*, rappelle l'auteure, historienne britannique des idées. En se concentrant sur les lieux de savoirs en Europe septentrionale, elle fait le récit de cette période de transformation marquée par un foisonnement intellectuel et la coexistence de conceptions contradictoires, comme les systèmes ptoléméen et copernicien, et où les érudits pratiquaient la magie antique parallèlement à l'observation empirique. **F. D.**

Dans le palais des étoiles, Violet Moller, Payot, 295 p., 23,50 €

L'IA sous tous les angles

TECHNOLOGIE Chercheuse en informatique et intelligence artificielle, Laurence Devillers opte pour une structure fragmentée abordant quantité de dimensions du sujet, intégrant le récent chatbot chinois DeepSeek à sa réflexion.

Sans nier la puissance des outils actuels ni leur utilité, elle en explique le coût énergétique, les enjeux économiques ou la tentation compréhensible de les anthropomorphiser. Avec des chapitres originaux sur les thèmes de l'émotion ou de l'imagination. **A. D.**

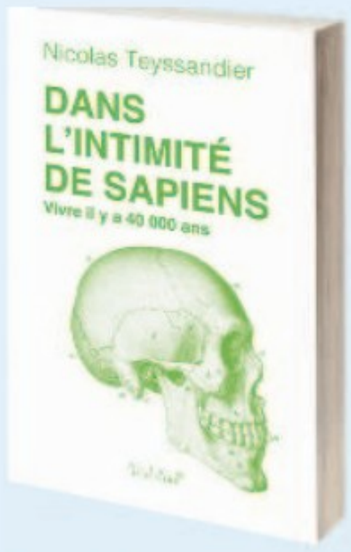
L'IA, ange ou démon ?, Laurence Devillers, Les éditions du Cerf, 288 p., 22 €

Comment nous avons façonné nos aliments

ÉVOLUTION Saviez-vous qu'à l'origine, la carotte était blanche ? Ou que le goût sucré du melon est une invention récente ? Dans cette série de récits courts, l'auteur retrace l'aventure de la domestication des fruits et légumes.

Accessible, ce livre montre comment l'être humain a profondément modifié ces plantes — de leur taille à leur goût, en passant par leur résistance et leur valeur nutritionnelle. En bonus : des infographies offrent une mise en perspective mondiale de ces transformations. **I. do O'G.**

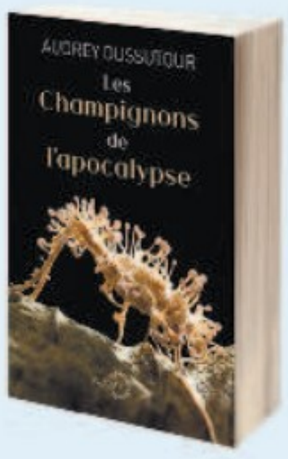
Pourquoi les bananes n'ont-elles pas de pépins ?, Benjamin Nowak, Dunod, 197 p., 19,90 €



Sapiens au jour le jour

IMMERSION Voici ce que nous a appris la science : il y a un peu plus de 40 000 ans, en pleine période glaciaire, *Homo sapiens*, chasseur-cueilleur nomade, sort d'Afrique et peuple progressivement le continent européen *(lire P. 64)*. Mais la vision est abstraite et soumise à des interrogations. À quoi ressemblaient ces premiers humains modernes ? Étaient-ils transis de froid ? Où et comment dormaient-ils ? Avaient-ils des chaussures ? Des peaux de bêtes sur le dos, comme nous le montraient les représentations d'artistes qui ont bercé notre enfance ? Que mangeaient-ils ? Vivaient-ils des histoires d'amour ? Avaient-ils peur de la mort ? C'est en répondant à ces questions substantielles que Nicolas Teyssandier, préhistorien et directeur de recherche au CNRS, retrace au jour le jour le parcours d'un groupe présent en Dordogne. En résulte un récit simple et vivant, loin des images caricaturales. ■ **Marine Benoit**

Dans l'intimité de Sapiens, Nicolas Teyssandier, Alisio, 224 p., 20,90 €



Danger champignons

ÉPOPÉE *« Il y a 1,3 milliard d'années, une population de microbes aquatiques ressemblant à des têtards miniatures s'est divisée en deux lignées : l'une a donné naissance aux animaux, l'autre aux champignons. »* Ainsi, nous partageons 50 % de notre ADN avec les champignons ! On estime qu'il existe quelque 5 millions d'espèces de champignons, dont seulement 140 000 décrites, et que leur biomasse est six fois supérieure à la nôtre. Dans cet ouvrage passionnant, qui mêle récit scientifique et intrigue inspirée par la série audiovisuelle *The last of us*, la biologiste Audrey Dussutour décrit les stratégies de certaines espèces de champignons marins et terrestres pour parasiter leurs hôtes, parfois jusqu'à provoquer leur mort. Voire la disparition d'espèces, telle la grenouille dorée du Panama et 90 autres espèces de grenouilles dans le monde. C'est aussi un champignon, isolé par Louis Pasteur à la fin du XIXe siècle, qui a mis à terre l'industrie de la soie française. Un récit fascinant. ■ **Sylvie Rouat**

Les Champignons de l'apocalypse, Audrey Dussutour, Grasset, 368 p., 23 €

Chasse au papillon

BD En découvrant la dernière livraison de papillons capturés dans la forêt amazonienne par un chasseur spécialisé, l'entomologiste Camille Simon est stupéfait d'y trouver un spécimen d'une espèce éteinte qui vivait jadis dans les marais de Rio, aujourd'hui recouverts par des favelas. Il s'ensuit une expédition au Brésil sur la piste du papillon, au cœur d'une forêt qui attire les convoitises de multinationales peu soucieuses de préserver la diversité et prêtes au pire pour défendre leurs intérêts. Une fable actuelle merveilleusement dessinée. **S. R.**

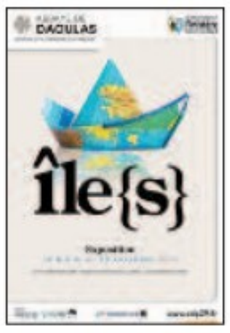
Les papillons ne meurent pas de vieillesse, Frédéric Bézian et Matz, Casterman, 88 p., 24 €

EXPOSITIONS

Amboise (37)

S'inspirer du vivant, de Léonard de Vinci à nos jours
Les travaux de Léonard de Vinci sont confrontés à des recherches contemporaines par le prisme du biomimétisme. La nature apparaît comme une source d'inspiration pour l'innovation technique.
Château du Clos Lucé, 2, rue du Clos-Lucé, du 7 juin au 10 septembre. Rens. : 02.47.57.00.73.

Daoulas (29)



Île(s)
Le concept d'île est décliné en dix thématiques, de la géologie aux utopies, et 350 œuvres incluant beaux-arts, art contemporain, objets d'archéologie sous-marine et arts populaires.
Abbaye de Daoulas, 21, rue de l'Église, jusqu'au 30 novembre. Rens. : 02.98.25.84.39.

Lyon (69)

Amazonies
Conçu en collaboration avec les peuples Ashaninka, Mebêngôkre, Wayana et Apalaï d'Amazonie brésilienne, ce parcours éclaire les interactions entre humains et environnement.
Musée des Confluences, 86, quai Perrache, jusqu'au 8 février 2026. Rens. : 04.28.38.12.12.

Nîmes (30)

Gaulois, mais Romains !
L'histoire de la transformation de la société gauloise sous l'Empire romain, en plus de 200 objets et des reconstitutions numériques.
Musée de la Romanité, 16, boulevard des Arènes, jusqu'au 4 janvier 2026. Rens. : museedelaromanite.fr

Paris (75)

Les derniers remparts, Carcassonne 1304
Une expérience immersive de 45 minutes dans la cité médiévale en pleine Inquisition. Le visiteur arpente les rues pavées et les remparts coiffé d'un casque de réalité virtuelle. Lire notre reportage : sciav.fr/940carcassonne
Espace Eclipso, 45, rue des Pirogues-de-Bercy (et aussi 112, cours Charlemagne, à Lyon, et 19-21, rue Saint-Sernin, à Bordeaux). Rens.: eclipso-entertainment.com

Le monde selon l'IA
Installations et œuvres d'art contemporaines évoquent nombre de débats autour de l'IA, qu'elle soit générative ou non. De l'usage de matériaux aux biais en passant par les micro-travailleurs du clic. Lire notre reportage : sciav.fr/940IA
Jeu de Paume, 1, place de la Concorde, jardin des Tuileries, jusqu'au 21 septembre. Rens. : 01.47.03.12.50.

Sensations quantiques
Ce parcours invite à ressentir les phénomènes quantiques plus qu'à les comprendre. Observations et expériences inspirent les œuvres, dont un film immersif. Lire notre reportage : sciav.fr/940quantique
Maison Poincaré, 11, rue Pierre-et-Marie-Curie, jusqu'au 26 juillet. Rens.: 01.44.27.67.89.

Toulouse (31)

Station spatiale Mir
La station russe construite dans les années 1970 fait l'objet d'une expérience de visite renouvelée, replacée dans le contexte des années 1990 et de la collaboration internationale spatiale.
Cité de l'espace, avenue Jean-Gonord. Rens. : 05.67.22.23.24.

PHILIPPE SOMNOLET / ITEM

Le parcours de l'exposition permet de comprendre les différents mécanismes d'adaptation des animaux (dont l'humain) dans des milieux hostiles.

Lyon (69) / Exposition

Trop forts !

Connaissez-vous la grenouille porteuse d'eau ? Elle est capable de ralentir son cœur et sa respiration et de rester plusieurs années ainsi, à attendre les prochaines pluies, dans des milieux arides à plus de 50 °C. Établi en haute altitude, le lama, lui, fait face au froid et au manque d'oxygène. *« Afin d'éviter les thromboses, ses globules rouges sont en forme de fuseaux »,* explique Jean-François Courant, chef de projet de cette exposition qui met en lumière les acclimatations (un processus rapide, non définitif et qui n'est pas transmis aux générations suivantes) et les adaptations (un changement lent, définitif et transmissible) des animaux — dont l'humain — pour survivre dans *« des conditions* a minima *hostiles, voire mortelles »*. Le parcours est aussi une occasion de rappeler que les capacités de ces animaux inspirent les chercheurs pour améliorer les technologies disponibles. Pourra-t-on un jour trouver une meilleure façon de conserver les organes avant une greffe en étudiant comment le spermophile arctique empêche son sang de geler ? Lire notre reportage : sciav.fr/939tropforts ■ **Anne-Sophie Tassart**

Musée des Confluences, 86, quai Perrache, jusqu'au 31 décembre. Rens. : 04.28.38.12.12.

Scannez ce QR code et retrouvez toutes les expositions dans notre guide

SCIENCES ET AVENIR
LES DOSSIERS

LES DOSSIERS SCIENCES ET AVENIR

LA SCIENCE AU MOYEN ÂGE

Astronomie • Bestiaires
Médecine • Université • Musique
Alchimie • Notre-Dame
Chiffres arabes • Optique
Hildegarde de Bingen

SCIENCE PHOTO LIBRARY / NYPL / SCIENCE SOURCE/SUCRÉ SALÉ/GETTY IMAGES

en vente en kiosque

Céline Guivarch, directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), groupe 3.

Christophe Cassou, directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec, groupe 1.

A. BILLET / UNIVERSCIENCE

CLIMAT PAR CÉLINE GUIVARCH ET CHRISTOPHE CASSOU

Agir de façon systémique

L'IPBES*, que l'on décrit parfois comme le Giec de la biodiversité, vient de publier un rapport de portée historique sur la biodiversité… mais aussi le climat, la santé, l'alimentation et l'eau. Baptisé Nexus, il met en évidence les liens qui relient ces enjeux et qui excluent *de facto* leur traitement en silo, indépendamment les uns des autres, contrairement à la plupart des pratiques actuelles. Les connaissances évaluées et synthétisées dans le rapport montrent que les solutions pensées pour maximiser un seul pilier du Nexus aggravent bien souvent les risques sur d'autres dimensions. Par exemple, chercher à maximiser le stockage du carbone pour atténuer le changement climatique avec des programmes de reforestation en monocultures a des effets néfastes sur la biodiversité et les ressources en eau. Dans bien des cas, les populations locales voient aussi leurs modes de vie mis à mal, leurs ressources et leur sécurité alimentaire menacées.

Mais le grand apport de la publication de l'IPBES est surtout d'évaluer plus de 70 « options de réponse » qui permettent des synergies entre les éléments du Nexus. On y trouve : la restauration des écosystèmes riches en carbone comme les mangroves et les zones humides ; la gestion de la biodiversité pour réduire le risque de propagation des maladies des animaux aux humains ; l'agroécologie ; les solutions urbaines fondées sur la nature (par exemple la végétalisation des villes), ou encore la réduction de gaspillages alimentaires et de la surconsommation de viande ainsi que le soutien des systèmes alimentaires indigènes. Ces options sont présentées sous forme d'une nouvelle « roue de la fortune » pour agir et éviter l'infortune des crises en cascade. ■

* Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques.

Professeure à l'université Claude-Bernard Lyon 1. Dernier ouvrage publié : *Le Rulpidon sous toutes ses coutures*, Dunod, 2024.

CAMILLE CIER / HANS LUCAS

MATHS PAR SYLVIE BENZONI-GAVAGE

Et pourtant elle tombe

C'est loin comment l'espace ? Vous connaissez la réponse si vous suivez l'actualité du « tourisme spatial » : l'espace commence à 100 km au-dessus de nos têtes. À peine l'épaisseur d'un zeste si l'on compare la Terre à une orange. La Station spatiale internationale (ISS) est quatre fois plus haut, mais encore mille fois plus proche que la Lune. Dans notre imaginaire, l'espace est associé à l'impesanteur grâce à laquelle les astronautes — ou la chanteuse Katy Perry — font des pirouettes échevelées. Est-ce à dire que quelques centaines de kilomètres suffisent pour ne plus ressentir la gravité ? Les spécialistes vous répondront bien sûr que non. Si vos amis pensent que si, vous pouvez les épater avec un calcul de coin de table. Car la gravité d'un corps céleste varie comme l'inverse du carré de la distance à son centre. En première approximation, la gravité décroît comme deux fois le rapport entre l'altitude et le rayon terrestre. Au niveau de l'ISS, ceci donne une gravité réduite de 12,5 % = 800/6400 par rapport à celle au sol. Pas de quoi expliquer les pirouettes. Alors pourquoi peut-on expérimenter l'impesanteur si près de la Terre ? L'explication est dans le mouvement.

Le vol des fusées des ultrariches leur procure une éphémère sensation d'impesanteur.

La rotation de l'ISS autour de la Terre compense la gravité terrestre en permanence, par effet centrifuge comme sur un tourniquet. Les spécialistes diront que l'ISS est en chute libre sur son orbite. Jusqu'à ce qu'elle soit désorbitée et tombe pour de bon… ■

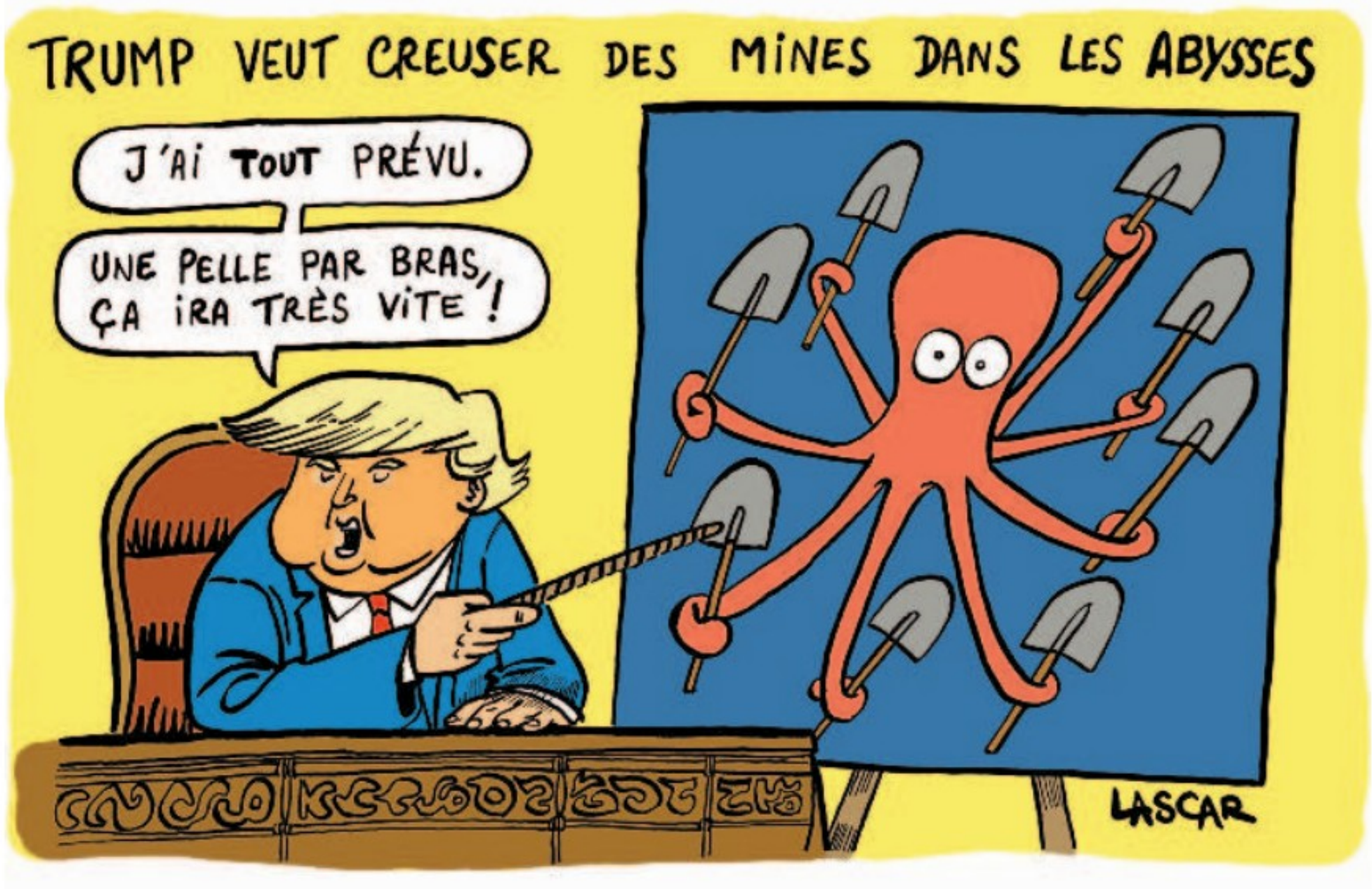
ÉTHIQUE PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA

Est-il moral de confier ses identifiants à des tiers ?

Professeur à Sorbonne Université, à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *L'I.A. expliquée aux humains*, Seuil, 2024.

Si vous avez des enfants d'âge scolaire, vous connaissez déjà Pronote ou École directe, ces services de gestion des données d'éducation accessibles en ligne. Pour autant, vous n'avez vraisemblablement pas encore entendu parler de Papillon, alors que vos enfants, eux, l'emploient peut-être… Conçue en 2021 par un étudiant âgé d'à peine 17 ans, Vince Linise, cette application pour smartphone offre une interface agréable, avec de belles couleurs et de multiples fonctionnalités « trop stylées », telles la visualisation de l'évolution des moyennes dans le temps ou la prise de selfies. Plus conforme aux codes de la jeunesse que ses prédécesseurs, Papillon rencontre un beau succès : début janvier, on comptabilisait plus de 700 000 téléchargements ! Pour opérer, le logiciel programmé en code source ouvert se connecte sur les comptes individuels des élèves avec les identifiants qu'ils lui confient et accède à leurs données. Il n'y a là rien d'illégal, puisque collégiens et lycéens donnent leur consentement et que les concepteurs respectent les règlements en vigueur sur la protection de la vie privée. Cela suscite toutefois quelques réserves. Sur le plan pédagogique d'abord, puisque l'application procède à des opérations sensibles, comme le suivi des moyennes individuelles et collectives. Sur le plan technique ensuite, car rien ne garantit la plateforme contre les cyberattaques et le vol de données. Sur le plan économique aussi, car elle fonctionne sur un mode parasite, en exploitant les données recueillies à grands efforts, et donc à grands coûts, par d'autres comme Pronote ou École directe. Sur le plan éthique surtout, car Papillon repose sur le don, par les lycéens et collégiens, de leurs identifiants personnels alors que ceux-ci devraient rester confidentiels et incessibles, sauf à des personnes de confiance, et encore… Ne faudrait-il pas commencer par l'enseigner à tous, dès le plus jeune âge ? À cet égard, rappelons que, dans le code des anciens bagnards, le tatouage en papillon signifiait « comme lui, je vole ». ■

BRUNO LÉVY



L'ŒIL DE LASCAR

Donald Trump a signé un décret ouvrant la voie à l'extraction à grande échelle de minerais dans les grands fonds océaniques, y compris dans les eaux internationales. Il contourne ainsi l'Autorité internationale des fonds marins (AIFM), dont les accords n'ont jamais été ratifiés par les États-Unis. ONG et scientifiques alertent sur les risques majeurs que cette exploitation ferait peser sur les écosystèmes marins. **O. L.**

QUESTIONS DE LECTEURS

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

PHYSIOLOGIE

Pourquoi les ados se couchent-ils tard ?

Frédérique C.

Chez les adolescents, l'horloge interne fonctionne plus lentement que chez les adultes et la sécrétion de la mélatonine, hormone qui favorise l'endormissement, est retardée. Deux facteurs qui transforment les jeunes en oiseaux de nuit : ils vont privilégier les grasses matinées et se coucher tard. Cette disposition naturelle chez les adolescents est renforcée par certains comportements : ils ont tendance à passer peu de temps à l'extérieur et utilisent beaucoup les écrans avant le coucher, ce qui retarde davantage l'horloge interne. L'idéal pour les ados serait de se coucher et de se lever tous les jours à heures régulières. ■ **L. L.**

ASTRONOMIE

À quelle altitude voit-on la courbure de la Terre ?

Sébastien L.

Selon les calculs fondés sur la géométrie sphérique et les témoignages de pilotes et astronautes, il faut monter à 15 km d'altitude environ (soit au-dessus des avions commerciaux qui ne dépassent pas les 13 km), pour commencer à apercevoir subtilement la courbure de la Terre, dont le rayon est d'environ 6371 km. À condition d'avoir en plus d'excellentes conditions météo et une très bonne acuité visuelle. En revanche, au-dessus de 20 km d'altitude, la courbure devient plus nettement visible. C'est ce que révèlent les images captées par des ballons-sondes ou des fusées lors de missions suborbitales. À la surface de notre planète, la courbure échappe à nos yeux pour une raison simple : notre champ de vision est trop limité et la courbure est trop faible sur de courtes distances. ■ **L. L.**

CHRISTOPHE ARCHAMBAULT / AFP

Récupérer des terres rares dans les déchets électroniques (ici au Bureau de recherches géologiques et minières) serait une alternative à leur extraction.

CHIMIE

Peut-on trouver et extraire des terres rares en France ?

Gérard CG.

Les terres rares forment un groupe de 17 éléments chimiques du tableau périodique (15 lanthanides, scandium et yttrium) et sont utilisées dans la fabrication de nombreuses technologies (batteries de voitures électriques, écrans plats…). Des gisements ont été identifiés en France, notamment en Bretagne et dans le Massif central. Car en réalité, les terres rares ne sont pas si rares ! On les trouve partout sur Terre, souvent en concentrations diffuses. Mais malgré ces ressources, la France n'en extrait pas sur son territoire, et ce pour plusieurs raisons. Tout d'abord, cette extraction est une industrie très polluante. Les minerais qui les contiennent sont souvent associés à des éléments radioactifs comme le thorium et l'uranium. Leur extraction implique l'utilisation de produits chimiques puissants (comme l'acide sulfurique), générant des boues toxiques difficiles à traiter. L'étape suivante — le raffinage — est encore plus polluante, car elle mobilise d'importantes quantités d'énergie et de réactifs chimiques pour séparer les différents éléments. En France, où les normes environnementales sont strictes, l'exploitation de ces minerais se heurte à des contraintes réglementaires et à une opposition locale. Dans un contexte où la transition énergétique vise à réduire l'impact écologique des industries, développer des mines de terres rares apparaît comme un contresens pour beaucoup d'opposants. Enfin, la rentabilité d'une telle industrie est loin d'être évidente. Extraire et raffiner les terres rares nécessiterait des investissements lourds, sans garantie de compétitivité face à la Chine. ■ **Lise Loumé**

LE CIEL DE JUIN

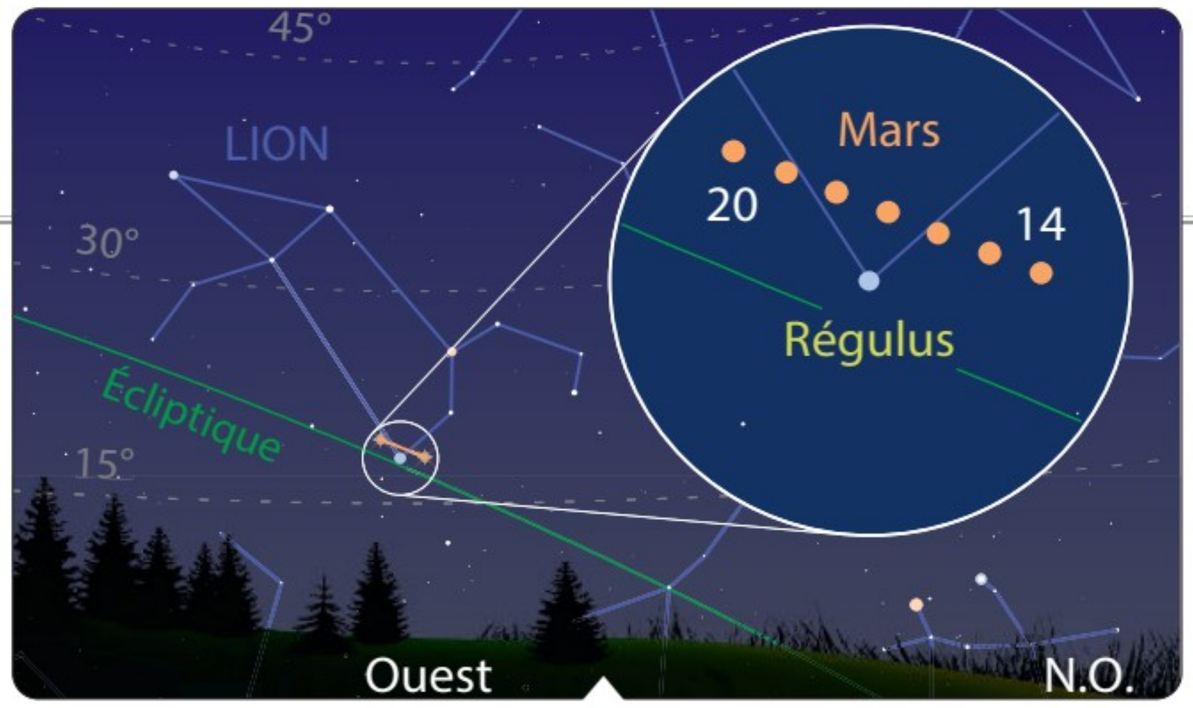
PAR JOHAN KIEKEN

Où sont les planètes ?

MERCURE En seconde partie de mois, la plus petite des planètes est visible en soirée vers le couchant. Elle passe sous l'horizon environ 1h30 après l'astre du jour.

VÉNUS L'étoile du Berger atteint sa plus grande distance angulaire (46°) à l'ouest du Soleil le 1er. Elle demeure toutefois relativement basse dans le ciel matinal. Heureusement, sa hauteur augmente au cours du mois en raison du redressement de l'écliptique le matin en cette saison.

MARS La planète Rouge se dévoile en soirée vers l'ouest. Moyennement brillante, on peut la confondre avec une étoile. Son mouvement par rapport Régulus *(lire ci-contre)*, d'un éclat comparable, peut aider à révéler sa nature planétaire. Elle se couche en milieu de nuit.



Nous sommes 1h30 après le coucher du Soleil. En milieu de mois, la planète Mars passe près de la brillante étoile Régulus. Le disque à droite montre la vue à travers une paire de jumelles, du 14 au 20.

Un duo tout en contraste

LES ÉTOILES PEU ÉLOIGNÉES DE L'ÉCLIPTIQUE sont régulièrement approchées par le Soleil, la Lune et les planètes. C'est le cas de Régulus, l'étoile principale de la constellation du Lion, qui se trouvera à moins de 1° de la planète Mars entre le 16 et le 18.

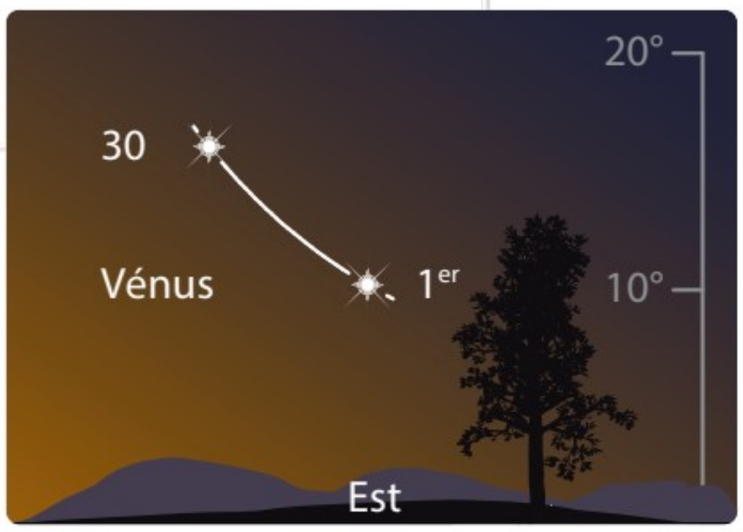
Notre conseil Déjà prête à se coucher, la constellation du Lion (qui ressemble à un fer à repasser) est facile à repérer en soirée vers l'ouest. Le mouvement relatif du duo céleste formé par Régulus, à la teinte bleutée et Mars, aux nuances caramel, est à ne pas manquer.

JUPITER La planète géante passe en conjonction avec le Soleil le 24. Elle n'est pas visible en juin.

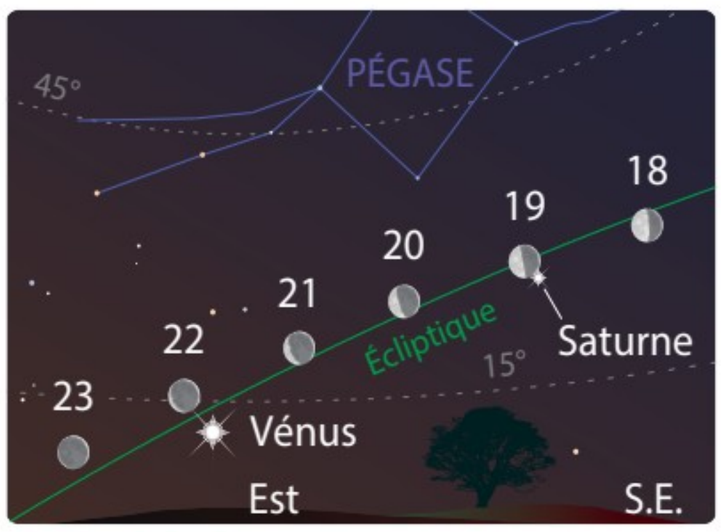
SATURNE La géante gazeuse devient mieux observable en fin de nuit dans la constellation des Poissons. Se levant de plus en plus tôt, elle gagne de la hauteur. Ainsi, 1 h avant le lever du Soleil, on la trouve à 15° de hauteur vers l'est-sud-est le 1er et à 30° de hauteur vers le sud-est le 30. Fait intéressant : ses anneaux sont quasiment vus par la tranche cette année.

L'appli du mois

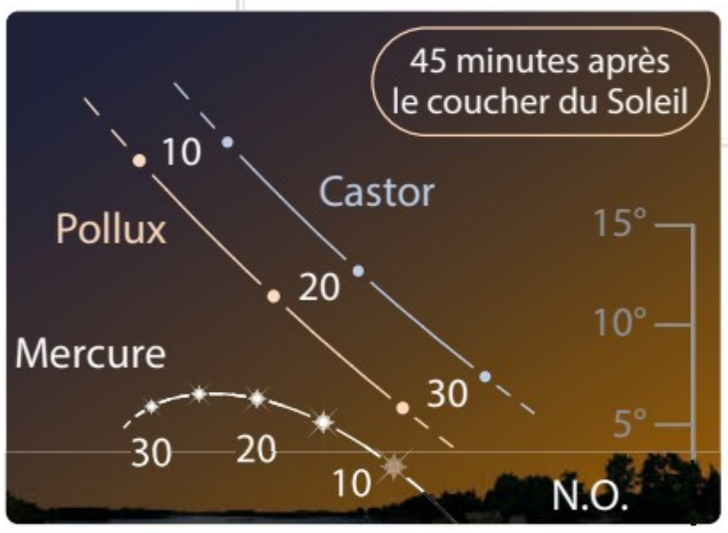
SATELLITE TRACKER est une application en français avec abonnement (0,99 € par mois) pour iOS et Android. Elle permet de localiser et de suivre en temps réel les satellites comme l'ISS ou Starlink et d'être alerté de leurs passages visibles depuis chez vous. Une aide précieuse pour lever les yeux au bon moment.



LE MATIN, 45 MINUTES AVANT LE LEVER DU SOLEIL, Vénus domine l'horizon est de son éclat étincelant. Ses conditions d'observation s'améliorent au fil des jours.



DU 18 AU 23, LA LUNE À LA PHASE DÉCROISSANTE rend successivement visite à Saturne (le 19) et à Vénus (le 22). La scène est présentée 1 h avant le lever du Soleil.



EN SOIRÉE, MERCURE EST OBSERVABLE en seconde partie de mois, bas vers le nord-ouest. Les étoiles Castor et Pollux des Gémeaux l'accompagnent durant cette période.

Scannez ce QR code pour découvrir la carte du ciel de juin

PAR PIERRE BERLOQUIN

SOLUTIONS DANS LE PROCHAIN NUMÉRO

▸ Chasse aux signes

Réaliserez-vous cette égalité en intercalant + - × et parenthèses entre les entiers ?

1 2 3 4 5 6 7 8 9
=
162

▸ Intrus logiques

Trouverez-vous au moins sept manières de distinguer un intrus logique parmi ces sept nombres ?

231 431 349 523 256 677 85

▸ Phrase bouleversée

Quel bouleversement systématique a subi cette phrase de Marcel Duchamp ?

Voir peut on celui qui regarde ne on mais peut pas entendre écoute qui celui.

▸ Logique baroque

Les six musiciens, Do, Ré, Mi, Fa, Sol et La vont en train au grand congrès de musique baroque d'Amsterdam. Leurs places sont réservées à raison de trois dans le compartiment 101 et trois dans le compartiment 102. Sachant que :

- Do ne supporte ni Ré ni Mi
- La est dans le compartiment 101
- Fa et Sol ont parlé ensemble pendant tout le voyage,

quelle était la répartition des voyageurs dans les deux compartiments ?

▸ Logique à la carte

Quelle règle suit ce menu ?

Menu	
Omelette	24
Champignons	18
Jambon	12
Radis	12
Saumon	?

Solutions des jeux parus dans « Sciences et Avenir » n° 939, mai 2025

Bon voyage, Madame la Comtesse

Écrivons le numéro sous la forme 1xyz.
Nous savons que :
x, y et z sont différents entre eux et différents de 8.
1 + x + y + z = 23.
Comme 23 est un nombre relativement élevé, essayons d'abord les xyz les plus élevés possible en excluant 8 : 6, 7 et 9.
Comme l'addition 1 + 6 + 7 + 9 = 23 est juste, ce sont les bons chiffres.
Puisque y = z + 1, le seul cas possible est z = 6 et y = 7.
Le numéro du billet est donc 1976.

Trajet numérique

24, 35, 51, 20, 33, 14, 15, 44, 21, 68

Somme ou produit ?

634 x 634 = 401956

Restaulogique

12 (deux fois le nombre de lettres).

14	12	9	22	10	→	67
15	8	19	2	25	→	69
5	20	23	11	1	→	60
7	3	13	16	24	→	63
21	18	6	17	4	→	66
↓	↓	↓	↓	↓		
59	62	61	70	68	64	65

Énigmes Créalude, Pierre Berloquin

LABORATOIRES
ILAPHARM
www.ilapharm.com

A vos côtés, pour votre santé !

Entreprise familiale française depuis 1992, nous vous proposons le meilleur des plantes pour une santé chaque jour renforcée.

**Offre valable 1 mois, 1 seule fois, réservée aux nouveaux clients. Non cumulable avec d'autres offres promotionnelles en cours.*

JAMBES LOURDES

- Active la circulation sanguine
- Légèreté et confort des jambes

45 gélules

6€

ARTICULATIONS

- Mobilité plus aisée
- Souplesse et confort articulaire
- 100% Harpagophytum

(1)

45 gélules

6€

MINCEUR

- Brûle-graisse naturel
- Besoin de perdre du poids
- Idéal avec le Nopal !

(3), (5), (10)

45 gélules

7€

LIBIDO

- Source d'énergie
- Aphrodisiaque
- Stimule le désir sexuel
- Idéal avec le Safran !

45 comprimés

7€

OS & ARTICULATIONS

- Constituant naturel des muscles, os et cartilages
- Formation du collagène

45 gélules

7€

DIGESTION

- Ballonnement et flatulences
- Soulagement rapide

(6), (15)

45 gélules

7€

PROSTATE

- Confort urinaire
- En cas de mauvais débit urinaire
- Prostate et vessie

45 capsules

7€

STRESS

- En cas de stress et fatigue passagère
- Magnésium et B6 : association optimale

Allergène : **poisson**. *(4)*

45 gélules

5€

CHOLESTÉROL

- Régulation du cholestérol
- Bonne santé cardiovasculaire

(10), (12)

30 gélules

7€

SEXUALITÉ

- Stimule l'érection
- Forte concentration en actifs (crocines)
- Idéal avec la Maca !

(3)

20 gélules

7€

MÉMOIRE

- Favorise la circulation cérébrale
- Concentration
- Esprit vif et alerte

(2), (5), (12), (13)

45 gélules

6€

FOIE - DRAINEUR

- Favorise le fonctionnement du foie
- Détoxifie

(7), (8), (9)

10 ampoules

7€ ~~15,60€~~

IMMUNITÉ

- Fonctionnement du système de défenses naturelles
- Idéal toute l'année !

(8), (14)

45 gélules

7€

SOMMEIL

- Calme et apaise
- Sommeil de qualité
- Ni accoutumance, ni somnolence

45 gélules

6€

POUR LA GORGE

- Gommes à base de Miel, Propolis et Eucalyptus
- Pour adoucir la gorge

45 g

6€ ~~9,90€~~

CAPITAL-VISION

- Préserve la vision au quotidien
- Bonne clarté visuelle

(11)

10 ampoules

7€ ~~18,40€~~

OFFRE DÉCOUVERTE

Dès **5€***

VOS 2 CADEAUX pour toute commande

OFFERTS

Les 2 Bols "Andalucia"

2 bols en verre, diamètre 15 cm, poids d'un bol 250 g.

La Livraison Dès 15€ d'achat — **0€**

Au lieu de 6,50€

Tous nos produits sont déconseillés aux enfants de moins de 18 ans et aux femmes enceintes ou allaitantes. (1) Déconseillé en cas d'ulcère gastrique ou duodénal. (2) Déconseillé en cas d'insuffisance cardiaque ou rénale œdémateuses. (3) Déconseillé en cas de prise simultanée d'antidépresseurs. (4) Déconseillé aux insuffisants rénaux. (5) Déconseillé aux personnes épileptiques. (6) Espacez la prise de médicaments de celle de ce produit d'au moins 2h. (7) Déconseillé en cas de problème de thyroïde. (8) Ne pas consommer en cas d'allergie aux plantes de la famille des Asteraceae. (9) Ne pas consommer en cas de maladie des voies biliaires et hépatiques. (10) Ne pas associer avec des anticoagulants. (11) En cas de troubles digestifs, consultez votre médecin avant consommation. (12) Déconseillé en cas de traitement concomitant par un médicament anti-rétroviral. (13) Déconseillé en cas de traitement antihypertenseur. (14) Déconseillé en cas de pathologie du système immunitaire. (15) Déconseillé en cas de d'allergie croisée connue, en particulier à la famille des Apiaceae ou au pollen d'armoise ou à l'anéthole. Les éventuelles traces d'allergènes sont indiquées sur l'étiquetage des produits.

NOS GARANTIES

PAYEZ DANS 1 MOIS

*Envoyez votre **réglement par chèque**, **avec votre bon de commande**, il ne sera encaissé que dans 1 mois.*

Charte Qualité fevad · synadiet · La Poste 72h

POUR COMMANDER

@ C'EST FACILE
sur notre site internet :
www.ilapharm.com

01 49 09 11 11
Du lundi au vendredi :
9h -13h et 14h -18h

ILAPHARM chez DIMOLOG
ZA de la Touche Tizon
8, rue René Panhard
35230 NOYAL-CHÂTILLON-SUR-SEICHE

COMMANDE "OFFRE DÉCOUVERTE" - SANS ENGAGEMENT

Vos coordonnées ☐ M^me ☐ M^r

Nom, Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code Postal : |_|_|_|_|_| Ville : .....

Tél. : ..... Date d'anniversaire : |_|_| |_|_| |_|_|_|_|

E-mail* : .....

pour recevoir les **Offres mails de nos partenaires** ☐ **OUI** ou ☐ **NON**

** Recommandé pour la livraison.*

Choisissez votre mode de paiement

☐ **Par carte bancaire (débit immédiat uniquement) :**

N° |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

Date d'expiration : |_|_|_|_|

Chiffres inscrits au dos de ma carte : |_|_|_|

Signature :

☐ **Par chèque, je choisis :** ○ débit immédiat ○ débit dans 1 mois à l'ordre des Laboratoires ILAPHARM

NOM DU PRODUIT	RÉF.	QTÉ	PRIX	TOTAL
JAMBES LOURDES - Vigne Rouge BIO	PVRB45		6€	
ARTICULATIONS - Harpagophytum BIO	PHAB45		6€	
MINCEUR - Guarana BIO	PGUB45		7€	
LIBIDO - Maca BIO	PMAB45		7€	
OS - Silicium Organique et Vitamine C	PSV45		7€	
DIGESTION - Charbon & Fenouil BIO	PCFB45		7€	
PROSTATE - Huile de Courge BIO	PPCB45		7€	
STRESS - Magnésium Marin et B6	PMM45		5€	
CHOLESTÉROL - Ail Noir BIO	PANB30		7€	
SEXUALITÉ - Safran BIO	PSFB20		7€	
MÉMOIRE - Ginkgo Biloba BIO	PGBB45		6€	
FOIE-DRAINEUR - Artichaut - Radis Noir BIO	PXRAB		7€	
IMMUNITÉ - Echinacéa BIO	PECB45		7€	
SOMMEIL - Passiflore BIO	PPAB45		6€	
GORGE - Gommes Propolis, Miel, Eucalyptus BIO	EVAG		6€	
CAPITAL-VISION - Myrtille Myrobalan BIO	PXMMB		7€	
☐ Je reçois **GRATUITEMENT** mes **2 BOLS** et mon **CATALOGUE**				**OFFERTS**
☐ Ma commande atteint 15€, **j'économise 6,50€ sur la livraison**				**OFFERTE**
☐ Ma commande est inférieure à 15€, **je rajoute 6,50€ de livraison**				
Code Privilège : **CS457**			**TOTAL À RÉGLER**	.....€

Laboratoires ILAPHARM SAS au capital de 38 112€, RCS Nanterre B 384 620 878 - 27 rue de Solférino - 92100 Boulogne. Tél Sce client 01.49.09.11.11. Offre et frais de livraison valables en France Métropolitaine. En cas d'indisponibilité de votre cadeau, nous pourrons le remplacer par un autre d'une valeur similaire. Pour recevoir votre cadeau sans commander, joignez un chèque de 6,50€ de frais, envoi sous 90 jours. Photos non contractuelles. Pour exercer les droits que vous confère le Réglement européen sur la protection des données, veuillez nous écrire, téléphoner au 01.49.09.11.11 ou consulter nos conditions générales de vente sur notre site internet. Vous bénéficiez des dispositions de la garantie légale de non-conformité et des vices cachés dont la mise en œuvre et le contenu sont prévus aux articles L. 217-4 et suivants du Code de la consommation. Vous disposez d'un délai de rétractation de 30 jours après livraison de votre commande pour retourner les produits pour remboursement ou échange sans pénalités, sauf frais de retour. Traitée dans les 48h suivant sa réception, vous recevez votre commande après 72h d'acheminement environ. Les Laboratoires ILAPHARM adhèrent à la fédération du e-commerce et de la vente à distance (FEVAD) et au service de médiation du e-commerce (BP 20015 - 75362 Paris Cedex 8 - mediateurduecommerce@fevad.com). ADEME emballages : FR202486_01JWKA, ADEME papiers : FR308139_031QWZ. Pour votre santé, mangez au moins 5 fruits et légumes par jour, consultez www.mangerbouger.fr. Conditions générales de vente : www.ilapharm.com/conditions-generales-de-vente.html Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres des Laboratoires ILAPHARM, cochez cette case ☐ ou écrivez-nous. Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres de nos partenaires (commerciaux ou organismes) : cochez cette case ☐ ou écrivez-nous.

NOUVEAU

C10

REEV

JUSQU'À

970 KM

D'AUTONOMIE

à partir de

329 € / mois*

Il dépasse les bornes.

Parcourez jusqu'à 145 km en 100% électrique et jusqu'à 970 km grâce à son prolongateur d'autonomie pour une expérience de conduite électrique augmentée.

À PARTIR DE 329€/MOIS*. 1ER LOYER DE 4 000€*.
LLD 48 MOIS/40 000KM.

* Exemple pour une location longue durée (LLD) d'une Leapmotor C10 REEV STYLE 158KWH neuve hors option. Offre non cumulable jusqu'au 30/04/2025, réservée aux particuliers dans le réseau participant sous réserve d'acceptation du dossier par CREDIPAR, loueur et SA au capital de 138.517.008 €, RCS Versailles n° 317 425 981, ORIAS 07004921 (www.orias.fr), 2-10 boulevard de l'Europe 78300 Poissy. Montants exprimés en TTC (hors assurances).

Modèle présenté : C10 REEV DESIGN neuf avec option (361€ TTC/mois aux mêmes conditions). Consommation mixte gamme C10 REEV : Consommations min/max (l/100km) : 0,4 ; Émissions de CO2 (g/km) : 10 à l'usage. Jusqu'à 970km d'autonomie combinée en WLTP.

POUR LES TRAJETS COURTS, PRIVILÉGIEZ LA MARCHE OU LE VÉLO #SEDÉPLACERMOINSPOLLUER

LEAPMOTOR

LANCEZ-VOUS